

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (ПНИПУ)**

На правах рукописи



БРЫЗГАЛОВ ВЛАДИСЛАВ ИГОРЕВИЧ

**УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ
ПАРАМЕТРАМИ ПЛАТНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ДЛЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПОВЫШЕННОГО СКОРОСТНОГО
РЕЖИМА**

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов,
мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Бургонутдинов Альберт Масугутович

Пермь 2026

Оглавление

Введение.....	4
ГЛАВА 1. ПЛАТНЫЕ АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ В РОССИИ И ЗАРУБЕЖОМ	15
1.1 Технические характеристики и скоростные режимы платных дорог в странах зарубежья и России.....	15
1.2 Особенности расположения пунктов взимания платы в странах зарубежья и России.....	24
1.3 Проблемы и особенности устройства платных автомобильных дорог	28
1.4 Основные выводы по Главе 1	30
ГЛАВА 2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНО- ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	32
2.1 Повышение надежности скоростного режима за счет управления транспортно-эксплуатационными параметрами платных дорог	32
2.2 Оценка надежности обеспечения скоростного режима в зависимости от интенсивности движения.....	60
2.3 Основные выводы по Главе 2	68
ГЛАВА 3. ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПУНКТОВ ВЗИМАНИЯ ПЛАТЫ КАК ФАКТОРА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА	70
3.1 Оптимизация размещения пунктов взимания платы.....	71
3.2 Практическое применение метода размещения пунктов взимания платы	82
3.3 Устройство безбарьерной системы оплаты	88
3.4 Основные выводы по Главе 3	96
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НАДЕЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА.....	98
4.1 Оценка эффективности внедрения инновационных решений для обеспечения надежности скоростного режима	99
4.2 Основные выводы по Главе 4	114
Заключение	116
Список литературы	118

Приложение 1	133
Приложение 2	138

Введение

Актуальность темы исследования. Правовые основы для внедрения платных автодорог в России, направленные на модернизацию дорожной инфраструктуры и повышение её технических стандартов, были впервые установлены в 1992 г. Соответствующие положения были закреплены в Указе Президента РФ Б. Н. Ельцина от 08.12.1992 № 1557 «О строительстве и эксплуатации автомобильных дорог на коммерческой основе».

Порядок организации платных автомагистралей был законодательно закреплён Указом Президента РФ от 27.06.1998 № 728 «О дополнительных мерах по развитию сети автомобильных дорог общего пользования».

Нормативы эксплуатации платных автодорог и магистралей с платными участками закреплены в Федеральном законе от 8 ноября 2007 г. № 257-ФЗ «Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Согласно данным Государственной компании «Российские автомобильные дороги», которая была создана в форме некоммерческой организации на основании Федерального закона от 17.07.2009 № 145-ФЗ «О Государственной компании “Российские автомобильные дороги” и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», по состоянию на 31.12.2023 протяженность платных участков автомобильных дорог увеличилась с 52,4 до 2855,0 км по сравнению с 2009 г. Строительство автомобильных дорог, формирующих систему скоростных дорог и платных автомагистралей, предусмотрено действующей Транспортной стратегией на период до 2030 г., утвержденной в новой редакции распоряжением Правительства РФ от 11 июня 2014 г. № 1032-р. На заседании Правительства 26 марта 2020 г. был обсужден новый проект Транспортной стратегии России на период до 2035 г. Основные цели: обеспечение транспортной связанности территории страны, организация эффективной перевозки грузов и пассажиров, встраивание транспортной

системы в мировую транспортную сеть и обеспечение безопасности транспортного комплекса.

Актуальность темы исследования обусловлена стратегической ролью платных автомагистралей в экономическом развитии и интеграции России, что выдвигает новые требования к качеству их функционирования. Как показывает анализ, платные дороги, особенно восточного направления, например трасса М-12 «Москва – Казань», становятся каркасом для решения двух ключевых задач: консолидации внутренних промышленных кластеров и формирования международных транспортных коридоров. Согласно данным ГК «Автодор», магистраль М-12, входящая в международный транспортный коридор «Европа – Западный Китай», к 2045 г. обеспечит совокупный рост валового регионального продукта (ВРП) в прилегающих регионах на 2,4 трлн рублей. При этом непосредственные фискальные поступления в бюджет (налоги, сборы) прогнозируются на уровне 600 млрд рублей. Прогнозируемый экономический эффект и масштаб перенаправляемых грузопотоков напрямую зависят от одного критического параметра – способности дороги обеспечивать стабильно высокую скорость доставки.

Необходимость настоящего исследования обусловлена следующими проблемными вопросами, выявленными на текущем этапе развития сети платных дорог:

1. Отсутствие комплексных моделей, связывающих динамику транспортно-эксплуатационных параметров дороги с надёжностью скоростного режима на всём жизненном цикле. Требуются детерминированные и прогнозные зависимости, позволяющие количественно оценивать, как изменения таких параметров, как модуль упругости дорожной одежды, продольная и поперечная ровность, влияют на возможность поддержания стабильно высокой скорости.

2. Существующая практика проектирования и размещения пунктов взимания платы на платных автомагистралях не учитывает их влияния на обеспечение надёжности скоростного режима. Традиционные пункты

взимания платы выступают точками принудительного торможения, формирования очередей и конфликтных маневров, создают дискретные зоны резкого снижения скорости. Это провоцирует движение по типу «разгон – торможение» в потоке, снижая его однородность, увеличивая время в пути и повышая риски возникновения дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Более того, эмпирические подходы к их пространственному расположению не обеспечивают минимизации совокупных транспортных издержек пользователей и не учитывают агломерационных эффектов (влияния крупных промышленных и логистических центров), что приводит к неоптимальной интеграции платной дороги в региональную транспортно-экономическую систему.

Степень разработанности проблемы. Вопросы устройства платных автомобильных дорог рассмотрены в работах С. В. Жадёновой [29], Д. А. Целковнева [66], П. Яворского [85], Шарады Р. Вадали [103]. Проблемы качества обслуживания водителей на платных автомобильных дорогах с помощью проведения опросов занимался В. А. Гусейналиев [26].

Работе пунктов взимания платы и повышению ее эффективности посвящены научные труды Т. Е. Кондратенко [36], В. В. Калининой [33; 34], Э. В. Дингеса [27], С. С. Власова [21; 22], Мурата Ф. Айсина [72, 73]. В исследованиях обоснованы оптимальные параметры для пунктов взимания платы, которые позволяют транспортному потоку снизить время на преодоления этих объектов. В работах В. В. Калининой предложены методы определения количества полос в зоне пунктов взимания платы, которые зависят от неравномерности движения транспортных средств за определенный период. В публикациях Э. В. Дингеса, С. С. Власова представлены методы расчета количества полос в пунктах взимания платы в зависимости системы массового обслуживания.

Выполненный анализ научных исследований показал, что обоснованы проекты создания платных автомобильных дорог и разработаны модели по обслуживанию водителей, проблемы повышения эффективности пунктов

взимания платы изучены в достаточной степени, предложены методы расчета количества полос и определены оптимальные геометрические параметры объектов пропуска транспортных средств.

Однако транспортно-эксплуатационные параметры платных автомобильных дорог для обеспечения надежности повышенного скоростного режима недостаточно изучены и нуждаются в дополнительных исследованиях.

Таким образом, актуальность диссертационного исследования предопределила выбор темы, формулировку цели и задач исследования.

Цель исследования – разработка и научное обоснование метода управления транспортно-эксплуатационными параметрами платных автомобильных дорог для обеспечения надежности повышенного скоростного режима.

Для достижения цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Выявить и систематизировать ключевые транспортно-эксплуатационные параметры платных автомобильных дорог, определяющие скоростной режим, на основе анализа зарубежного и отечественного опыта их проектирования и эксплуатации.

2. Разработать параметрическую модель управления надежностью скоростного режима платных автомагистралей на основе установления количественных зависимостей между транспортно-эксплуатационными параметрами дорожной одежды, геометрическими характеристиками трассы и динамикой скоростных показателей транспортного потока.

3. Разработать и обосновать методику оптимального размещения пунктов взимания платы на платных автомобильных дорогах, обеспечивающую снижение дисперсии скоростей и повышение надежности скоростного режима за счет устранения зон принудительного торможения.

4. Провести комплексную оценку эффективности предложенных инструментов (параметрической модели и методики размещения пунктов

взимания платы) в обеспечении целевого уровня надежности скоростного режима платной автомобильной дороги.

Объект исследования: платные автомобильные дороги в Российской Федерации.

Предмет исследования: транспортно-эксплуатационные параметры платных автомобильных дорог и метод размещения пунктов взимания платы.

Методология и методы исследования базировались на основе сопоставительного анализа, математической статистики, математического моделирования, а также на графоаналитическом, электронно-вычислительном и корреляционно-регрессионном подходах.

Научная новизна исследования:

– впервые разработана параметрическая модель управления надежностью скоростного режима платных автомобильных дорог, отличающаяся от существующих для дорог общего пользования учетом экономически обоснованного уровня риска снижения скорости. В отличие от традиционного подхода (обеспечение нормативной скорости с заданной вероятностью для всех участков), предложенная модель позволяет ранжировать участки платной магистрали по стоимости часа простоя пользователя (value of time – VOT), устанавливая дифференцированные допуски на изменение модуля упругости и ровности. Это впервые позволяет перейти от принципа «ремонт при достижении предельного состояния» к принципу «превентивное управление, минимизирующее потери от снижения скорости», что критически важно для коммерческой эффективности платного проекта;

– в установление количественных и качественных закономерностей влияния интенсивности движения на изменение распределения скоростей транспортного потока на платных автомобильных дорогах, заключающихся в выявлении точек перегиба на кривой «скорость – интенсивность», соответствующих переходу потока из свободного состояния в насыщенное,

что позволило обосновать границы стабильности транспортного потока для повышения точности прогнозирования надежности дорожной конструкции;

– разработан метод пространственной оптимизации размещения пунктов взимания платы (ПВП), адаптирующий теорию локализации А. Вебера к условиям платных автомагистралей, впервые учитывающий не только грузопотоки (массу), но и дисперсию скоростей транспортного потока как критерий оптимизации. Новизна подхода заключается в том, что целевой функцией выступает не минимизация транспортных издержек доставки грузов, а минимизация дисперсии скоростей транспортного потока на километре дороги за счет исключения зон принудительного торможения. Это позволяет обосновать размещение ПВП не в точке минимума транспортных затрат, а в зоне устойчивого равновесия, где потери от торможения/разгона компенсируются агломерационными эффектами.

Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в развитии теоретических основ управления транспортно-эксплуатационным состоянием платных автомобильных дорог. Разработанные параметрические модели устанавливают новые количественные связи между изменениями прочностных и геометрических характеристик дорожной одежды и обеспеченности расчетной скорости на платных дорогах. В рамках адаптации теории пространственной локализации А. Вебера для оптимизации размещения пунктов взимания платы впервые в качестве самостоятельного критерия использована дисперсия скоростей транспортного потока. Целевая функция трансформирована от минимизации транспортных издержек доставки грузов к минимизации дисперсии скоростей транспортного потока на километре дороги за счет исключения зон принудительного торможения.

Практическая значимость работы представлена разработанной параметрической моделью по управлению надежностью скоростного режима платных автомобильных дорог. Установлены количественные зависимости между изменением модуля упругости и ровности дорожной одежды во

времени, геометрическими параметрами трассы и результирующими скоростными характеристиками транспортного потока (средней скоростью, ее дисперсией, коэффициентом обеспеченности расчетной скорости). Результаты позволяют прогнозировать и предупреждать снижение эксплуатационных характеристик дороги. Выявлены параметры зависимости «скорость – интенсивность» для условий высокоскоростного движения на платных дорогах. Полученные количественные данные могут служить исходными моментами для решения прикладных задач проектирования и управления платными автомобильными дорогами. Разработан метод размещения пунктов взимания платы, в котором, в отличие от классического подхода А. Вебера, ключевыми факторами выступают не только масса перевозимых грузов (совокупный потенциал грузообразования промышленных узлов) и расстояние транспортировки, но и дисперсия скоростей транспортного потока как самостоятельный критерий оптимизации. Целевая функция сформулирована как минимизация дисперсии скоростей транспортного потока на километре дороги, что позволяет обеспечить стабильность скоростных характеристик за счёт сокращения вынужденных маневров и неоправданных изменений скорости движения. Оптимальное расположение ПВП способствует поддержанию равномерного скоростного режима и снижению дисперсии скоростей, что является одним из основных факторов повышения надежности транспортной системы в целом.

Кроме того, практическая значимость работы подтверждается востребованностью результатов исследования среди научно-исследовательских организаций – об использовании, реализации и внедрении результатов исследования имеется три акта из трех организаций (Приложение 2).

Достоверность научных положений и результатов подтверждаются:

– обоснованностью методологической базы. Теоретические положения и математические модели, используемые для анализа надежности,

прогнозирования изменения модуля упругости и ровности покрытия, а также зависимости скорости от геометрических параметров, основаны на апробированных исследованиях (КаздорНИИ, профессора Ю. М. Яковлев, М. С. Коганзон и др.). Применение теории пространственной локализации А. Вебера адаптировано к транспортной задаче с четким обоснованием аналогий и введенных допущений;

– верификацией моделей и зависимостей по натурным данным. Все теоретические выкладки и выводы подтверждены результатами натуральных экспериментов на реальном объекте – платной автомагистрали М-12 «Восток». Измерения ровности покрытия, скоростного режима, интенсивности и состава движения выполнены на репрезентативном количестве участков. Это обеспечивает представительность выборки и применимость результатов к объекту исследования;

– для обработки экспериментальных данных использованы стандартные методы математической статистики: расчет математического ожидания, дисперсии, стандартного отклонения, коэффициента вариации. Установление количественных зависимостей (например, скорости от ширины полотна, уклона или радиуса кривой) выполнено методом корреляционно-регрессионного анализа с построением графиков и уравнений связей. Решение задачи оптимизации размещения ПВП выполнено методом линейного программирования (транспортная задача), что гарантирует однозначность и точность полученного решения.

Положения, выносимые на защиту

Разработана и апробирована предиктивная методика управления транспортно-эксплуатационными параметрами платных автомобильных дорог, основанная на квантильной оценке рисков (VaR – Value at Risk) снижения скорости ниже договорного уровня (установленного концессионным соглашением). В отличие от детерминированных подходов для дорог общего пользования, методика впервые позволяет оценивать упущенную выгоду (потерю дохода) от недоремонта и обосновывать сроки

проведения работ исходя из баланса «стоимость ремонта — сохранение платёжеспособного спроса.

Установлены критерии учета интенсивности движения при оценке надежности скоростного режима на платных дорогах, основанные на выявлении периодов стабильности транспортного потока, что позволяет повысить достоверность исходных данных для моделирования и управления. Определение репрезентативных временных интервалов для измерения интенсивности на платных дорогах основано на анализе суточной и недельной динамики коэффициента вариации потока.

Адаптированная теория пространственной локализации А. Вебера для оптимизации размещения ПВП, в которой ключевым фактором выступает не масса грузопотока, а «стоимость неоднородности» транспортного потока, выражаемая через дисперсию скоростей. Доказано, что на платных дорогах с повышенным скоростным режимом традиционное размещение ПВП в центре тяготения грузопотоков вызывает образование заторов и ежесуточные потери времени 78 авт./ч.

Личный вклад соискателя состоит в постановке и реализации задач исследования, включенном участии на всех этапах процесса, непосредственном участии соискателя в получении исходных данных по транспортно-эксплуатационным параметрам и интенсивности движения на платных автомобильных дорогах, личном участии в апробации результатов исследования, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Апробация результатов исследования. Полученные результаты были представлены на: International Science and Technology Conference (FarEastCon) (6–9 октября 2020 г., г. Владивосток); XII Всероссийской молодежной конференции аспирантов, молодых ученых и студентов «Современные технологии в строительстве. Теория и практика» (13–15 мая 2020 г., г. Пермь); XIV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 75-летию Победы в Отечественной войне (20–22 мая 2020 г., г. Волгоград); Международной

научно-практической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (5–6 ноября 2020 г., г. Пермь); XV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (19–21 мая 2021 г., г. Волгоград); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Химия. Экология. Урбанистика» (20–21 апреля 2023 г., г. Пермь); VIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых» (25–26 апреля 2024 г., г. Омск); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Химия. Экология. Урбанистика» (17–19 апреля 2024 г., г. Пермь); IX Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» (21–22 ноября 2024 г., г. Омск); 76-й Международной научной конференции «Социотехническое строительство» (76 МНК) (14–29 апреля 2025 г., г. Казань).

Результаты исследований отмечены первыми местами в международном конкурсе научных работ студентов, магистрантов и аспирантов 2021–2022 учебного года высших учебных заведений и факультетов дорожного профиля (г. Москва, 2022) и во всероссийском конкурсе проектных и исследовательских работ «Развитие дорожно-строительного комплекса России» (г. Москва, 2025).

Публикация результатов исследования. По тематике диссертационного исследования всего опубликовано 17 научных работ, из них:

– семь статей [4; 7; 11; 12; 14; 19; 20] в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК для публикаций диссертационных исследований по защищаемой специальности и отрасли наук (три статьи в журнале «Транспорт. Транспортные сооружения. Экология» (категория «К2»); две статьи в журнале «Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета» (категория «К1»); одна статья в журнале

Construction and Geotechnics (категория «К2»); одна статья в журнале «Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика» (категория «К2»);

– одна статья [69] в издании, индексируемом международной базой Scopus (журнал IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (квартиль Q3)), который в соответствии с Рекомендациями ВАК от 21.12.2023 № 3-пл/1 приравнивается к публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, категории «К1».

Дополнительно по тематике платных автомобильных дорог было опубликовано 17 научных работ, в том числе три входящие в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 106 наименования, и двух приложений. Основной текст содержится на 117 страницах и включает 28 рисунков, 16 таблиц.

Благодарности. Соискатель выражает благодарность кандидату технических наук, доценту кафедры «Автомобильные дороги и мосты» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» **Марине Олеговне Карпушко** за всестороннюю помощь на всех этапах выполнения диссертации.

ГЛАВА 1. ПЛАТНЫЕ АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ В РОССИИ И ЗАРУБЕЖОМ

1.1 Технические характеристики и скоростные режимы платных дорог в странах зарубежья и России

Развитие сети платных автомобильных дорог представляет собой значительный интерес в контексте совершенствования транспортной инфраструктуры и повышения эффективности грузовых и пассажирских перевозок. Сравнительное исследование параметров платных дорог, включая их технические и скоростные характеристики, позволяет выявить общие тенденции и национальные особенности в организации дорожного движения. Актуальность данного исследования обусловлена возрастающей ролью платных автомагистралей в транспортных системах России и зарубежных стран, а также необходимостью оптимизации их эксплуатационных характеристик для обеспечения эффективного функционирования.

Методологическую основу исследования составляет сравнительный анализ нормативно-правовых документов, технических регламентов и статистических данных, регулирующих функционирование платных дорожных систем в различных странах. Основными критериями сравнения выбраны: технические параметры дорожной инфраструктуры и скоростные режимы.

Инфраструктура платных дорог в Соединенных Штатах Америки функционирует в соответствии с децентрализованной нормативно-правовой базой, где проектирование, эксплуатация и ценообразование в основном регулируются отдельными штатами и местными транспортными органами, а не единым федеральным мандатом [83]. Несмотря на различия в оперативном управлении, все платные объекты, финансируемые из федерального бюджета, должны соответствовать национальным стандартам проектирования.

Платные дороги в США, как правило, проектируются в соответствии с теми же стандартами, что и автомагистрали общего пользования. Основные

технические параметры платных магистралей США регламентируются AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) и федеральными стандартами FHWA (Federal Highway Administration) [100]:

- расчётная скорость: 70 миль/ч (113 км/ч), в горной местности – 50 миль/ч (80 км/ч);
- максимальный продольный уклон: в равнинной местности – 40 %, в горной местности – 60 %;
- максимальный поперечный уклон – 20 %;
- минимальное количество полос – 4 (по две в одном направлении);
- минимальная ширина полосы – 12 футов (3,7 м);
- минимальная ширина обочины – 4 фута (1,2 м);
- минимальный радиус в плане – 650 футов (200 м).

В Соединенных Штатах Америки действует система регулирования скоростного режима, при которой допустимые значения устанавливаются в зависимости отдельных штатов и территорий, что приводит к значительным региональным различиям. В западных штатах характерны ограничения от 70 до 80 миль/ч (113–129 км/ч), тогда как на востоке страны аналогичные дороги имеют ограничения в 65 – 70 миль/ч (105–113 км/ч).

Как отмечают Жан Й. Джи, Дебаприя Чакраборти, Алан Дженн [86], Цзинцю Чен, Шуюань Ван, Уильям Дж. Эллиот и др. [91], платные дороги в США имеют ряд преимуществ, связанных с их конструкцией, финансированием и влиянием на транспортную систему:

- высокое качество дорожного покрытия и инфраструктуры: платные магистрали отличаются улучшенным покрытием по сравнению с альтернативными маршрутами. Это связано с тем, что на многих платных трассах используется монолитное бетонное покрытие, которое меньше подвержено износу;
- меньшая загруженность и более высокая скорость движения: платные дороги имеют меньше съездов и пересечений, а также разрешён более высокий скоростной режим по сравнению с альтернативными дорогами;

– снижение интенсивности движения на дорогах общего пользования, что особенно актуально для крупных мегаполисов.

Несмотря на очевидные операционные и технологические преимущества, система платных дорог в Соединенных Штатах Америки сталкивается с рядом системных недостатков: неэффективное использование пропускной способности: платные дороги часто не соответствуют проектной загрузке из-за высокой стоимости проезда, вследствие этого современная инфраструктура с улучшенными параметрами используется не в полной мере; региональные различия в стандартизации: отсутствие единых федеральных стандартов для платных дорог приводит к значительным различиям в скорости движения. Данные проблемы также были затронуты в работах Сяокунь Кара Ван, Уджон Ким, Дапенг Чжан [105].

Платные автомагистрали Европы составляют основу международных и внутренних перевозок, обеспечивая высокоскоростное сообщение между экономическими центрами.

Проектирование и строительство платных автомагистралей в Южной Европе (Италия, Испания, Франция, Португалия) регулируется национальными нормативными актами, директивами и техническими требованиями частных концессионеров. Несмотря на то что в каждой стране действует своя административная система, можно выделить общие принципы проектирования, в которых особое внимание уделяется обеспечению передвижения с высокими скоростями, безопасности движения, комфорту водителей и эффективности эксплуатации. Проектирование платных автомобильных дорог выполняется по тем же стандартам, что и для дорог общего пользования.

Проектирование платных дорог в Италии регулируется нормами, установленными Министерством инфраструктуры и транспорта, закрепленными в Дорожном кодексе от 30 апреля 1992 г.

Технические параметры дорог во Франции регулируются серией документов, в частности Кодексом дорожного движения и различными руководствами и техническими инструкциями.

Документом, регулирующим технические параметры дорог в Испании, является Общий регламент автомобильных дорог, который утверждается Королевским указом. Кроме того, Закон об автомагистралях устанавливает общую нормативную базу, а Министерство транспорта публикует конкретные технические правила в виде инструкций и стандартов.

Документом, регулирующим технические параметры дорог в Португалии, является закон от 27 апреля 2015 г. № 34/2015, утверждающий статус дорог национальной дорожной сети.

Основные параметры платных автомобильных дорог для европейских стран представлены в Таблице 1.1 [78; 88; 93; 94].

Таблица 1.1 – Основные параметры платных дорог в странах Европы

№ п/п	Показатель	Италия	Испания	Франция	Португалия
1	Расчетная скорость, км/ч	130	120	130	120
2	Максимальный продольный уклон:				
	– в равнинной местности, ‰	50	60	60	50
	– в горной местности, ‰	35	40	40	30
3	Максимальный поперечный уклон, ‰	25	20	30	30
4	Минимальное количество полос (в одном направлении), шт.	2	2	2	2
5	Минимальная ширина полосы, м	3,5	3,5	3,5	4,0
6	Минимальная ширина обочины, м	1,5	1,5	2,0	1,5
7	Минимальный радиус в плане, м	250	250	300	250

Платные дороги в Европе играют ключевую роль в транспортной системе, но их внедрение и использование сопровождаются как позитивными, так и негативными последствиями. Анализируя научные труды Андреа Палиотто, Моника Меоччи, Валентины Бранци, Франсиско Х. Регаладо Лопеса, Хосе Магин Кампос Качеды, Лор Атиаса, Стефана Соссье, Пауло Фигейраса, Диого Гонсалвеша, Рубена Коста, Гильерме Геррейро, Паноса Георгакиса, Рикардо Жардим-Гонсалвеша [71; 95; 96; 97], в качестве преимуществ можно выделить:

– высокую скорость передвижения: платные дороги в Европе обеспечивают более высокую скорость и лучшее техническое состояние по сравнению с дорогами общего пользования, что обеспечивает более быстрое и эффективное передвижение;

– улучшенную инфраструктуру: зоны отдыха и обслуживания чаще встречаются и обладают сервисом повышенного комфорта, которые могут включать автозаправочные станции, рестораны, магазины и места для пикников;

– повышенные требования по безопасности дорожного движения;

– использование интеллектуальных транспортных систем: эти системы позволяют управлять дорожным движением в режиме реального времени, например, корректировать ограничения скорости в зависимости от погоды или загруженности.

Авторы Карл Дж. Гамильтон, Джонас Элиассон [81; 82] также отмечают существенные недостатки в эксплуатации платных магистралей:

– перегруженность бесплатных альтернативных маршрутов и образование заторов, например в Испании, интенсивность движения на дорогах-дублерах платной трассы AP-7 в час «пик» увеличивается до 25 %;

– рост затрат на транспортировку: в Италии стоимость доставки грузов увеличивается на 12 % из-за сбора платы с грузовых автомобилей;

– перегруженность технических средств взимания платы: в Португалии в связи со сбоем системы Via Verde было выписано свыше тысячи ошибочных штрафов за неуплату проезда.

На основе анализа можно резюмировать, что технические нормы и подходы к определению скоростных параметров платных автомагистралей в европейских странах демонстрируют единство базовых принципов, но существенные отличия в деталях и приоритетах.

На данный момент Китай занимает лидирующую позицию по длине автомобильных дорог в мире. С каждым годом происходит увеличение

протяженности дорог и развитие транспортной инфраструктуры (Рисунок 1.1).

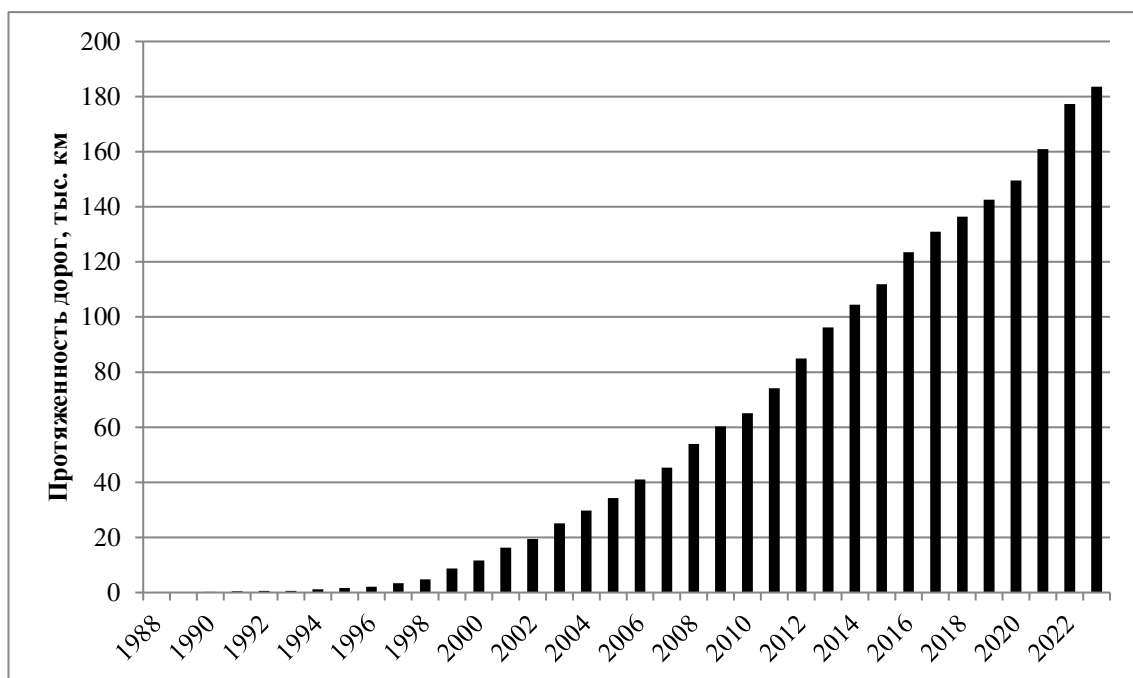


Рисунок 1.1 – Протяженность национальных автомобильных дорог в Китайской Народной Республике

Стандарты проектирования платных дорог в Китае регулируются комплексом национальных и местных нормативных документов, которые учитывают технические, климатические и географические особенности страны. Основным документом, определяющим общие требования к проектированию, включая выбор трассы, геометрические параметры, дорожную одежду и искусственные сооружения, а также учитывающим интенсивность движения, тип грунта и климатические условия, является – JTG D20-2017 «Технические условия на проектирование автомобильных дорог» [84]. Основные параметры и особенности включают следующие:

- расчётная скорость – 120 км/ч, в горной местности – 80 км/ч;
- максимальный продольный уклон: в равнинной местности – 40 %, в горной местности – 50 %;
- максимальный поперечный уклон – 20 %;
- минимальное количество полос – 8 (по четыре в одном направлении);
- минимальная ширина полосы – 3,5 м;

- минимальная ширина обочины – 1,8 м;
- минимальный радиус в плане – 350 м.

Платные автомобильные дороги в Китае обладают рядом значительных преимуществ, что находит подтверждение в работах Тхи Ми Тхань Чыонг, Ханно Фридрих, Чотчай Чароеннгам [76]:

- высокая пропускная способность: платные дороги представлены многополосной проезжей частью, что способствует повышению пропускной способности автомобильной дороги;
- повышенная скорость движения: ограничение скорости на платных дорогах выше, чем на дорогах общего пользования.

В качестве недостатков Янь Сюй, Фань Цзяньцян, Хайчэн Сюй [106] выделяют проблемы перегруженности, износа, высокую стоимость. Сеть платных дорог создавалась в первую очередь для экономического роста, что определило её ориентированность на грузовые перевозки и транзит, способствуя снижению комфорта для водителей легковых автомобилей.

Первые платные автомобильные дороги в Японии появились в 60-х гг. XX в., когда страна принимала Олимпиаду. В настоящее время платные дороги продолжают развиваться, что позволяет разгрузить трассы и уменьшить возможность образование заторов. Также платные участки помогают обеспечивать сообщение между крупными городами и населенными пунктами во время стихийных бедствий.

Технические характеристики японских автомагистралей формируются под влиянием двух основных факторов: дефицита равнинных территорий и высокой сейсмической активности. Это определяет следующие ключевые особенности:

- доминирование искусственных сооружений: ввиду горного рельефа значительную часть сети составляют сложные инженерные сооружения;
- особенности геометрических параметров: на горных участках часто встречаются протяжённые участки с постоянным уклоном и серии поворотов.

Основными нормативными документами по проектированию автомобильных дорог в Японии являются «Стандарты геометрического проектирования», утвержденные Министерством земельных ресурсов, инфраструктуры, транспорта и туризма и включают в себя основные принципы [98]:

- расчётная скорость – 100 км/ч, в горной местности – 80 км/ч;
- максимальный продольный уклон: в равнинной местности – 30 ‰, в горной местности – 90 ‰;
- максимальный поперечный уклон – 30 ‰;
- минимальное количество полос – 2 (по одной в одном направлении);
- минимальная ширина полосы – 3,0 м;
- минимальная ширина обочины – 1,0 м;
- минимальный радиус в плане – 300 м.

Территория Японии на 73 ‰ – горы, что требует прокладки тоннелей (например, тоннель Сэйкан длиной 53,85 км) и виадуков. Как отмечают Тошио Куцукаке, Юичи Мохри, Хидеки Ока, Шоичи Канеко [70], строительство огромного количества тоннелей, мостов и эстакад приводит к удорожанию процесса, но при этом позволяет снизить количество пересечений и конфликтных точек, что повышает безопасность дорожного движения.

В России практика внедрения платных автодорог развивается относительно недавно, особенно на фоне мирового опыта [10]. Первым стал 20-километровый реконструированный участок трассы «Дон», запущенный в 1999 г. в Липецкой области. Наибольший вклад в развитие платных дорог РФ вносят С. В. Жаденова [29], Т. Е. Кондратенко [36], Д. А. Целковнев [66].

Согласно п. 1 ст. 40 Федерального закона от 08.11.2007 № 257-ФЗ «Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», использование платных магистралей или их участков возможно только после заключения соглашения концессионного типа с владельцем

дороги или уполномоченным оператором. Это требование распространяется как на юридические, так и на физические лица, осуществляющие движение по таким трассам.

В соответствии с п. 4 ст. 40 Федерального закона № 257-ФЗ использование платных федеральных автодорог и их участков осуществляется в рамках нормативов, закреплённых Постановлением Правительства РФ от 19.01.2010 № 18. Данный документ, именуемый как «Правила оказания услуг по организации проезда транспортных средств по платным автомобильным дорогам общего пользования федерального значения, платным участкам таких автомобильных дорог», регламентирует порядок доступа транспортных средств к таким магистралям, включая организацию их эксплуатации [31].

Проектирование платных автомобильных дорог осуществляется по тем же нормативным документам, что и дорог общего пользования, а их параметры зависят от категории: ширина полосы движения – 3,5–3,75 м; минимально количество полос – 2; минимальная расчетная скорость – 100 км/ч; наибольший продольный уклон – 50 ‰; наименьший радиус кривой в плане – 600 м (400 м – в горной местности). Предельно допустимая скорость составляет 110 км/ч, на ряде участков трасс (М-11 «Москва – Санкт-Петербург», М-4 «Дон») допускается 130 км/ч [42].

Развитие сети скоростных и платных автодорог в России закреплено в действующей Транспортной стратегии до 2030 года, принятой в обновлённой редакции Постановлением Правительства от 11.06.2014 № 1032-р. В марте 2020 г. на заседании кабмина был представлен проект новой редакции стратегии, продлённой до 2035 г. [61; 63]. Её ключевые задачи включают:

- укрепление транспортного единства регионов страны;
- повышение эффективности грузовых и пассажирских перевозок;
- интеграцию национальной транспортной системы в глобальные сети;
- обеспечение безопасности и устойчивости транспортного комплекса.

1.2 Особенности расположения пунктов взимания платы в странах зарубежья и России

В мировой практике расположение ПВП определяется комплексом взаимосвязанных факторов [76; 92]:

– транспортно-эксплуатационный: интенсивность и структура транспортного потока, обеспечение плавности движения и минимизация заторов;

– экономико-инвестиционный: требуемый объем привлечения частных инвестиций, необходимость быстрой окупаемости проекта;

– инженерно-планировочный: требования к безопасности дорожного движения, наличие пространства для организации полос торможения – разгона, площадок для технологического и служебного транспорта, геометрические параметры дороги (уклоны, видимость).

Расположение и конструкцию ПВП в зарубежных странах определяет тип применяемой системы расчетов, широко распространены три основные модели [80]:

1. Барьерная (открытая) система: данная система характеризуется взиманием фиксированной платы за проезд через конкретный пункт, независимо от пройденного расстояния. Особенностью расположения является возможность для водителя один раз оплатить проезд и далее перемещаться по определенному участку или объекту без дополнительных остановок. Это классическая, исторически сложившаяся модель, широко применяемая на Северо-Востоке США, в Италии, Испании, Франции, Португалии.

2. Система билетов (закрытая система): в данной системе плата рассчитывается пропорционально расстоянию, пройденному между точкой въезда на платную дорогу и точкой съезда. Такая система, применяемая, например, на магистральных Нью-Йорка (New York State Thruway) или Нью-Джерси (New Jersey Turnpike), требует более плотной и сложной сети ПВП, интегрированной со всеми узлами доступа к дороге.

3. Система «Свободный поток»: это наиболее современная модель, ставшая возможной благодаря повсеместному внедрению электронного сбора платы. Плата взимается на основе точного пройденного расстояния, но без необходимости остановки транспортного средства. ПВП в этой системе представляют собой навесное оборудование, оснащенное устройствами для автоматического распознавания номерных знаков. Примером служит Китай, Япония.

Влияние на расположение ПВП также оказывает платежная система. В Соединенных Штатах Америки распространено множество платежных систем, которые действуют на территориях определенных штатов (Рисунок 1.2). Большая часть платных автомобильных дорог обустроена Cashless tolling – системой безналичного сбора, а оплата за проезд производится с помощью транспондера. Недостаток данного способа оплаты заключается в том, что платежная система действует не во всех штатах [83].

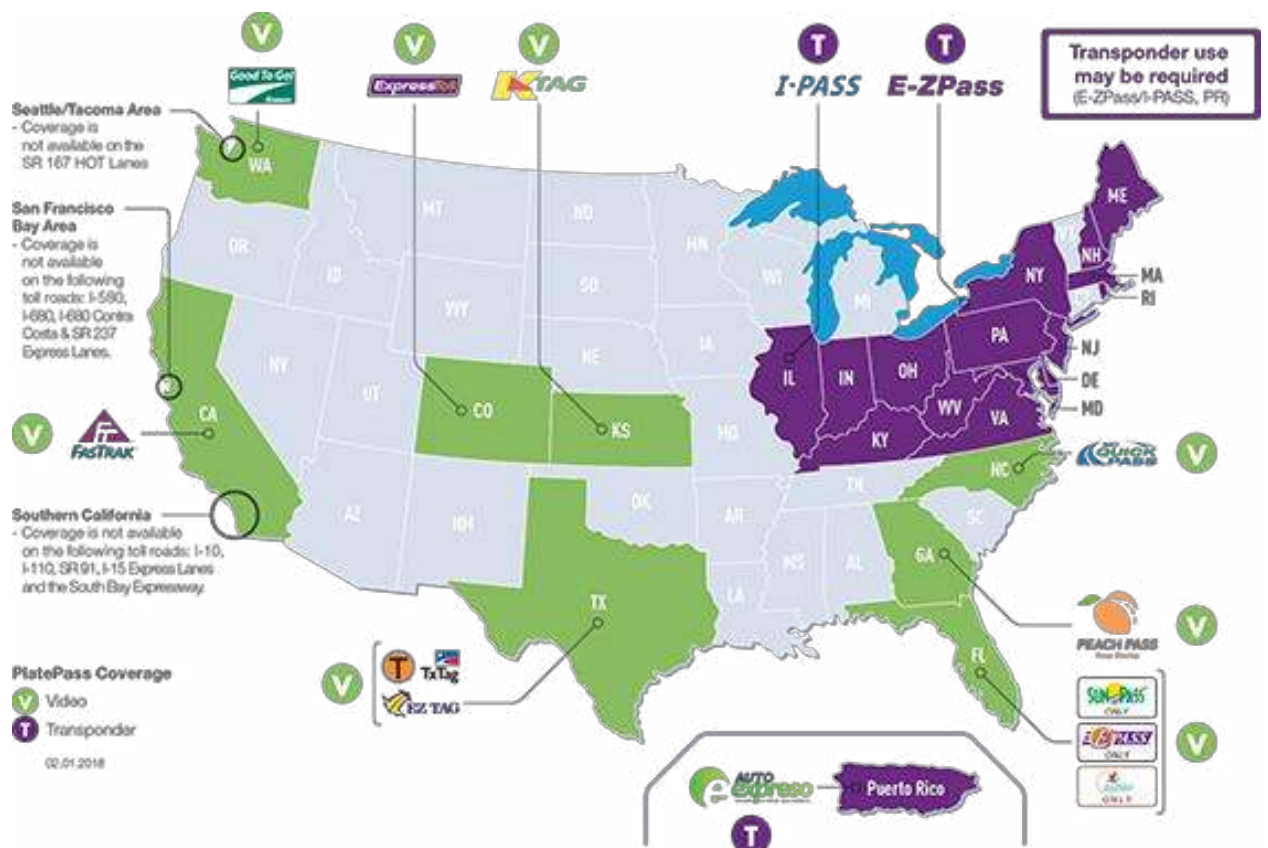


Рисунок 1.2 – Платежные системы США [104]

Самый распространенный способ оплаты за проезд в Европе – виньетка (Рисунок 1.3): она представляет собой наклейку на лобовое стекло и за определенную сумму предоставляет неограниченное количество проездов по платной автомагистрали, но регламентирован период использования. Ее цена различна и зависит от категории транспортного средства, времени действия и страны. Период действия виньетки зависит от предпочтений водителя: от пары дней до года. Приобрести их можно на заправочных станциях, площадках отдыха, на пограничном переходе. Сама виньетка устроена таким образом, что использовать ее можно только один раз, перевесить на другой автомобиль запрещено [75].



Рисунок 1.3 – Крепление виньетки на лобовое стекло [30]

Платные дороги в Китае представляют собой уникальный пример интеграции масштабной инфраструктуры, передовых технологий и государственной стратегии, направленной на оптимизацию транспортных потоков и устойчивое развитие. Китайские платежные системы для платных дорог эволюционировали от ручных кассовых пунктов к цифровым технологиям, ставшим мировым эталоном автоматизации. Внедрение Electronic Toll Collection (ETC), охватившей более 250 млн пользователей в 2023 г., мобильных платежей через WeChat Pay и Alipay, а также эксперименты с искусственным интеллектом и распознаванием номерных знаков демонстрируют стремление Китая к созданию «умных» транспортных коридоров [89].

В Японии с каждым годом набирает популярность и прогрессирует интеллектуально-транспортная система (ITS). Система эксплуатируется на всех платных трассах. С помощью ITS происходит мониторинг дорожных заторов, и информация предоставляется водителям, устранение дорожно-транспортных происшествий, снижение выбросов в атмосферный воздух. Сбор информации происходит с помощью: ЧМ-вещания (радиовещание на основе метода чистой модуляции), радиоволн и инфракрасного излучения [90].

Расположение ПВП при проектировании платных дорог определяется, исходя из комплексной инженерной и экономической целесообразности, где ключевую роль играет выбранная система взимания платы. После выбора системы происходит определение конкретных мест с учетом [77]:

- расположения развязок (съездов/въездов);
- топографических условий местности и геометрических параметров дороги: ПВП размещают на прямых горизонтальных участках с хорошей видимостью, обеспечивая достаточное расстояние для безопасного торможения и последующего разгона;
- интенсивности движения: в зависимости от пропускной способности, назначается количество и ширина полос.

Низкая пропускная способность ПВП в Российской Федерации во многом является следствием ошибочных расчетов на этапе проектирования. Ключевыми проблемами становятся неверный прогноз интенсивности движения транспортных средств, а также неоптимальные проектные решения, касающиеся количества, пространственного расположения пунктов и выбора технологий сбора платежей, что в совокупности и приводит к снижению фактической эффективности их работы [36].

На предпроектной стадии необходимо определить комплекс базовых параметров, которые закладывают основу для всего последующего проектирования ПВП. Эти параметры можно сгруппировать по нескольким ключевым факторам:

1. Транспортный поток (прогнозируемая интенсивность движения, требуемое количество полос, категории транспортных средств).
2. Техничко-технологические решения (система оплаты, доступная площадь для застройки ПВП).

Важно отметить, что в Российской Федерации существует проблема нормативно-правового регулирования проектирования пунктов взимания платы. Ситуация характеризуется отсутствием современной и единой нормативной базы, что приводит к значительным сложностям в практике дорожного строительства.

1.3 Проблемы и особенности устройства платных автомобильных дорог

Платные дороги, требуют комплексного подхода к проектированию, направленного на удовлетворение потребностей пользователей. Повышение пользовательских характеристик: удобства, безопасности, скорости и экономической доступности остается ключевой проблемой, осложненной техническими, социальными и экологическими проблемами.

Платные дороги обладают рядом отличительных характеристик по сравнению с бесплатными аналогами, которые обеспечивают их повышенную привлекательность для пользователей:

- качество покрытия (соблюдение повышенных стандартов при строительстве и обслуживании, быстрое устранение повреждений и деформаций полотна, регулярная обработка антигололедными реагентами в зимний сезон);
- скоростные условия (проложение трассы в обход населенных пунктов, отсутствие светофоров, лежачих полицейских и иных препятствий);
- сервисная инфраструктура (обустроенные зоны отдыха с парковками, смотровыми площадками и многофункциональными сервисными комплексами с автозаправками);
- безопасность и контроль (видеонаблюдение вдоль всей автомагистрали для мониторинга обстановки, автоматизированные системы

управления движением и оповещения, быстрое реагирование аварийных служб на инциденты, метеорологические станции для прогнозирования погодных условий, организация транспортных потоков);

- эффективность, проявляющаяся в следующих факторах: повышение пропускной способности транспортной системы за счёт рационального распределения потоков, сокращение времени в пути благодаря минимизации простоев на дорогах, экономия топлива за счёт равномерного движения, уменьшение износа механических частей транспортных средств, что ведёт к увеличению их срока службы.

В проектировании платных автомобильных дорог можно выделить следующие основные проблемы:

1. Инфраструктурные ограничения. В больших развитых странах, например, как Россия, существует большое количество географических и климатических условий (горные, заболоченные или северные регионы), где требуются повышенные затраты и специализированные инженерные решения. С данной проблемой сталкиваются при строительстве дороги «Джугба – Сочи», где из-за прохождения трассы по Кавказским горам потребовались строительство тоннеля и мероприятия по укреплению откосов. С дефицитом пространства также сталкиваются на Токийских платных дорогах, где возникают сложности организации ПВП, что приводит к их размещению на многоярусных эстакадах. Всё это влечет за собой удорожание строительства объектов.

2. Технологические сложности. При интеграции платежных систем возникают сложности в несовместимость стандартов между регионами и странами, что создает барьеры для водителей. Сбои в работе транспондеров или камер распознавания номеров приводят к заторам и недовольству пользователей при путешествии между странами Европы. Проблемы несовместимости решаются через комбинацию стандартизации, технологических внедрений и международного сотрудничества. Однако для

полной интеграции требуется время и дополнительные инвестиции в инфраструктуру.

3. Организация пунктов взимания платы. Основной проблемой остается образование заторов в зонах оплаты, особенно при использовании систем с участием кассира-оператора. Также существенным недостатком является недостаточное количество полос движения, особенно в часы «пик», когда загруженность на дорогах увеличивается. По этим причинам в США время проезда через пункты взимания платы увеличивается на 20–30 % [74], а ежегодные экономические потери в странах Евросоюза достигают 2–3 млрд евро [79].

Платные дороги предлагают современный и безопасный формат передвижения, ориентированный на комфорт и экономию времени. Их ключевые преимущества – высокая скорость, развитая инфраструктура и минимум ограничений – делают их оптимальным выбором для грузовых доставок и длительных путешествий.

Проектирование платных автомобильных дорог в настоящее время включает в себя не только инженерные задачи, но и затрагивает современные цифровые инновации, а также влияет на социальные и экологические аспекты. Для повышения пользовательских характеристик и привлечения новых пользователей необходимо развитие электронных систем оплаты (внедрения бесконтактной системы оплаты, расширение применения транспондеров и мобильных приложений), повышение качества обслуживания (создание гибкой системы обслуживания, модернизация пунктов взимания платы), усовершенствование технологической инфраструктуры (обеспечение интероперабельности с системами других стран, создание универсальной системы взаимодействия между различными электронными системами оплаты).

1.4 Основные выводы по Главе 1

Проведенное сравнительное исследование позволило выявить следующие ключевые закономерности и национальные особенности в

области технических характеристик и скоростных режимов платных автомобильных дорог:

1. **Общность базовых принципов проектирования.** Во всех рассмотренных странах (США, страны Европы, Китай, Япония, Россия) платные автомагистрали проектируются и строятся в соответствии с национальными стандартами, зачастую идентичными или превышающими требования к дорогам общего пользования высших категорий. Это обеспечивает их ключевые конкурентные преимущества: высокое качество покрытия, повышенную безопасность и комфорт движения.

2. **Единство и разнообразие в технических параметрах.** Наблюдается единая направленность на обеспечение высоких скоростей движения и пропускной способности, что выражается в схожих требованиях к расчетной скорости (110–130 км/ч), ширине полосы (3,5–4,0 м). Однако существуют национальные различия, обусловленные географическими, климатическими и экономическими факторами.

3. **Технологическая конвергенция.** Наблюдается глобальный переход от традиционного взимания платы к созданию интегрированных интеллектуальных транспортных систем. Тренд ведет к системе «Свободный поток» как к целевой модели, минимизирующей вынужденные остановки.

4. **Параметры проектирования и инфраструктуры.** Анализ технических, эксплуатационных и организационных параметров платных дорог позволяет выделить критические параметры, определяющие их эффективность и безопасность: расчетная скорость, геометрические параметры (продольный уклон, ширина проезжей части и обочин, радиус кривой в плане), качество дорожного покрытия.

ГЛАВА 2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В настоящее время автомобильные дороги выступают ключевым элементом инфраструктурного комплекса страны. Их роль в формировании устойчивых транспортных коммуникаций и стимулировании социально-экономических процессов на территории России трудно переоценить. Дорожная сеть не только обеспечивает бесперебойное передвижение транспортных средств, но и служит основой для развития регионов, способствуя укреплению межрегиональных связей и повышению качества жизни населения. Одним из ключевых аспектов обеспечения непрерывного, безопасного и комфортного движения транспортных средств с оптимальными скоростями и заданными нагрузками является их надежность.

В связи с повышением требований к безопасности и долговечности дорожных одежд вопрос об обеспечении надежности, сохранения работоспособности и требуемого уровня транспортно-эксплуатационных качеств автомобильных дорог становится актуальным.

2.1 Повышение надежности скоростного режима за счет управления транспортно-эксплуатационными параметрами платных дорог

В исследовании [58] анализ надежности автомобильной дороги, представляющей собой сложную систему, состоящую из множества элементов, проводится с разделением на этапы: проектирование, строительство и эксплуатация (Рисунок 2.1).

На этапе проектирования целевой показатель надежности $N_{тр}$ рассчитывается с учетом ряда коэффициентов: по нагрузке, материалу и условиям эксплуатации. Уже на этой стадии проектная надежность $N_{пр}$ может быть ниже требуемой $N_{тр}$ на величину $\Delta_{пр}$. Это снижение связано с систематическими погрешностями, такими как неточная оценка качества материалов, прогнозирования интенсивности движения и влияния

климатических факторов. В ходе строительства происходит дальнейшее снижение надежности на величину $\Delta_{пт}$ относительно проектного значения $H_{пр}$. Данное отклонение обусловлено как объективной спецификой технологических процессов, так и субъективными факторами управления ими. В результате на начало эксплуатационного периода дорога характеризуется одним из возможных уровней надежности: $H_э$, $H'_э$ или $H''_э$. В процессе эксплуатации без проведения ремонтов происходит постепенное снижение надежности на переменную величину $\Delta_э$. В наихудшем случае, при уровне $H_э$, отказ сооружения (снижение надежности ниже предельного значения) происходит до истечения нормативного срока службы $T_{сл}$.

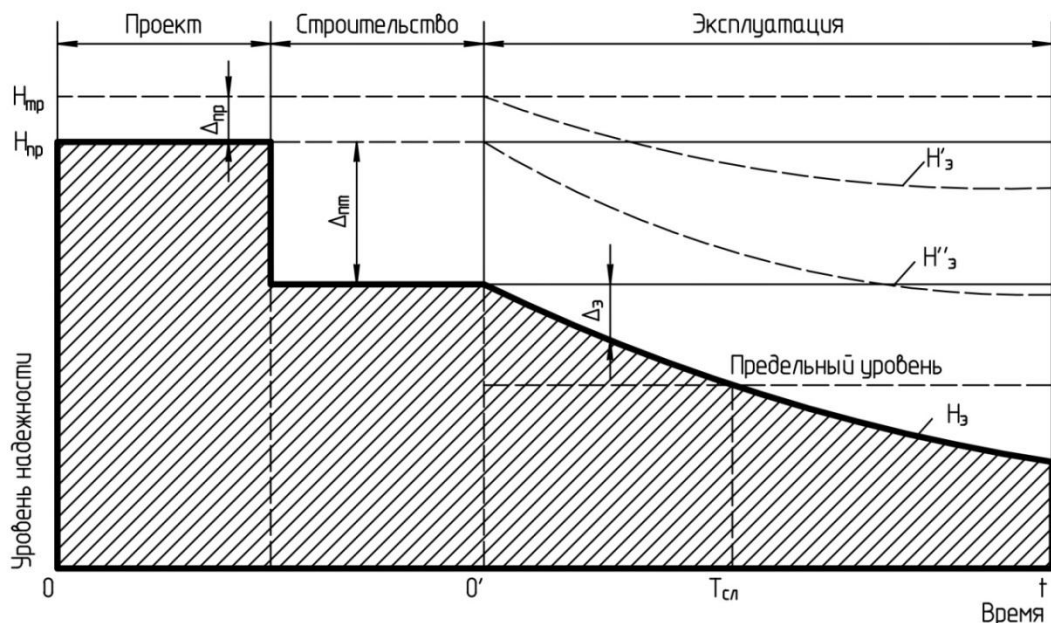


Рисунок 2.1 – Диаграмма снижения надежности дорожного сооружения на этапах жизненного цикла: проектирование, строительство, эксплуатация [58]

Надежность автомобильной дороги можно определить как способность транспортной инфраструктуры поддерживать безопасное движение транспорта с оптимальными скоростными параметрами на протяжении всего предусмотренного проектом или заданного периода эксплуатации.

Для дорог общего пользования такой подход ориентирован на предотвращение физического отказа (разрушения конструкции). Однако для платных автомобильных дорог ключевым показателем эффективности

становится не только безопасностью, но и стабильное обеспечение скоростного режима, влияющее на платёжеспособный спрос. В связи с этим возникает необходимость пересмотра понятия надёжности: под надёжностью платной дороги следует понимать её способность поддерживать безопасное движение с оптимальными скоростными параметрами на протяжении заданного периода эксплуатации, обеспечивая тем самым запланированный уровень доходности концессионера.

Введение критериев безопасности дорожного движения объясняется двумя основными причинами. Первая заключается в прямой зависимости уровня безопасности от скорости и средних скоростных показателей транспортного потока. Вторая связана с тем, что экономические потери от ДТП, согласно исследованиям [53], могут достигать 30 % от общих расходов за расчетный период их накопления. Для платных дорог к этому добавляется фактор упущенной выгоды при снижении скорости ниже договорного (концессионного) уровня: пользователи, не получая ожидаемого временного выигрыша, могут отказаться от использования маршрута, что приводит к недополучению доходов.

Скоростной режим на автомобильных дорогах, являющийся ключевым индикатором их транспортно-эксплуатационного состояния (ТЭСАД), в значительной степени определяется характеристиками дорожной одежды. Наиболее важными из этих характеристик являются прочность, ровность и шероховатость покрытия [38; 41]. При этом проектирование дорожной одежды основывается на таком первичном параметре, как модуль упругости. Что касается скорости движения, то она выступает результирующим параметром, на который напрямую влияет ровность покрытия при сохранении прочих условий.

Согласно исследованиям КаздорНИИ, проведенным под руководством профессоров Ю. М. Яковлева, М. С. Коганзона, В. Е. Кагановича и др. [31; 35; 38], в процессе эксплуатации дороги изменение прочности (оцениваемое

по модулю упругости) происходит по определенной трехэтапной схеме (Рисунок 2.2).

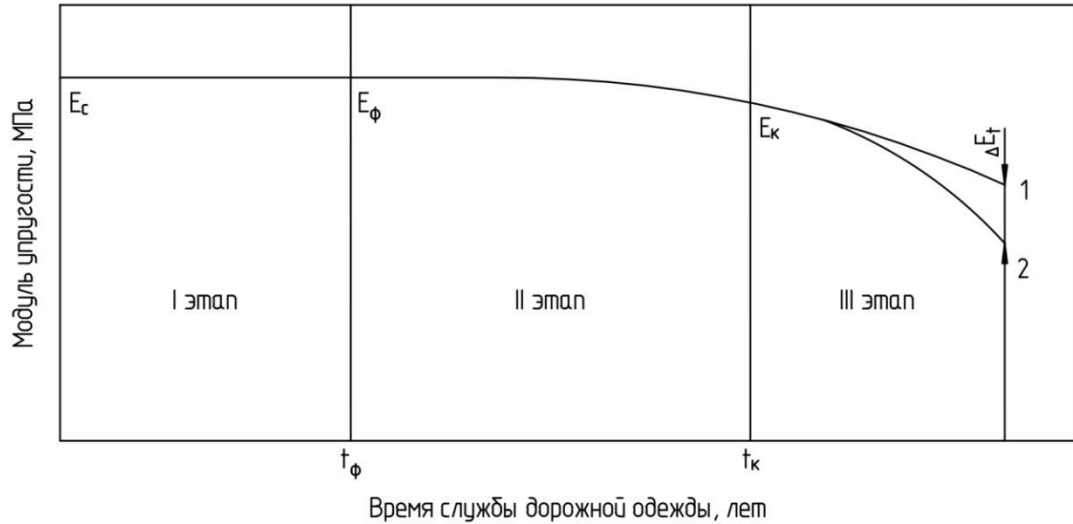


Рисунок 2.2 – Зависимость модуля упругости дорожной одежды от времени эксплуатации [38]: E_c – модуль упругости непосредственно после строительства, МПа; E_ϕ – модуль упругости после формирования конструкции дорожной одежды, МПа; E_k – модуль упругости в конце расчетного срока службы, МПа; t_ϕ – продолжительность периода формирования дорожной одежды, лет; t_k – планируемый срок проведения капитального ремонта, лет

Первый этап (продолжительностью около 2–3 лет, в зависимости от интенсивности движения) представляет собой период стабилизации (формирования) дорожной одежды, в течение которого модуль упругости сохраняется примерно постоянным ($E_c \approx \text{const} = E_\phi$). На втором этапе под совокупным воздействием транспортных нагрузок и климатических условий наблюдается постепенное снижение прочности до величины E_k . На третьем, финальном, этапе конструкция эксплуатируется после исчерпания ресурса своей работоспособности. Величина прогнозируемого снижения модуля упругости (ΔE_t) на этой стадии определяется мерами по ограничению движения транспорта.

Для прогнозирования срока службы дорожной одежды (t_k) на втором этапе необходимо учитывать ряд ключевых факторов: тип конструкции, интенсивность и состав транспортного потока, а также прогнозируемое изменение этих параметров во времени и нормативный срок службы одежды. Эти данные составляют основу информационной базы. Зависимость,

описывающая изменение модуля упругости на данном этапе, имеет следующий вид [38]:

$$E_t = E_1 \times \left\{ 1 - \left[a_m + b_m \times \left(\lg n_p \times N_{\text{пр1}} \times \frac{q^{t-1}}{q-1} + \lg t \right) \right] \right\}, \quad (2.1)$$

где E_1 – модуль упругости в первый год эксплуатации после завершения стадии формирования, МПа; $N_{\text{пр1}}$ – приведенная интенсивность движения к расчетной нагрузке группы А на первый год службы после формирования дорожной одежды, авт./сут; q – коэффициент, характеризующий изменение интенсивности движения во времени; t – прогнозируемый срок службы, лет; n_p – нормативный период, принимаемый равным 365 дням; a_m , b_m – коэффициенты уравнения.

Численные значения коэффициентов a_m и b_m были получены в результате анализа экспериментальных данных методами математической статистики. Для дорожной одежды капитального типа нежесткой конструкции были установлены следующие величины: $a_m = -0,237$; $b_m = 4,75 \cdot 10^{-2}$ [35; 38].

На третьем, завершающем этапе эксплуатации дорожная одежда функционирует в условиях полностью исчерпанного ресурса.

Анализ позволил установить, что в течение первого и второго этапов службы дорожной одежды снижение математического ожидания модуля упругости m ($m > 0$) во времени влечет за собой аналогичное снижение в m раз стандартного отклонения σ_E и в m^2 раз – дисперсии. В этих условиях коэффициент вариации C_E сохраняет постоянное значение, что свидетельствует о стабильности статистической надежности конструкции даже при уменьшении уровня модуля упругости [24; 38].

Для моделирования процесса изменения модуля упругости дорожной одежды было рассмотрено распределение модуля упругости в общей совокупности по 20 отдельным экспериментальным участкам трассы М-12 «Восток» (Дюртюли – Ачит (км 90 – км 140) (Таблица 2.1). Интенсивность движения принята 9360 авт./сут (согласно Разделу 2.2). Ввиду отсутствия

данных инструментальной оценки прочности нежесткой дорожной одежды, в исследовании применяется расчетный метод. Он основывается на определении коэффициента прочности $K_{пр}$ в зависимости от средневзвешенного балла состояния покрытия согласно ОДМ 218.4.039-2018 «Рекомендации по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог». Указанный балл рассчитывается для характерного участка дороги, что позволяет установить вероятную величину $K_{пр}$:

$$K_{пр} = \frac{B_{ср}}{10} + 0,5, \quad (2.2)$$

где $B_{ср}$ – средневзвешенный балл на характерном участке.

Таблица 2.1 – Распределение модуля упругости дорожной одежды

Показатель	Номер участка				
	1	2	3	4	5
Средневзвешенный балл ($B_{ср}$)	4,97	4,99	4,97	4,95	4,91
Коэффициент прочности ($K_{пр}$)	0,997	0,999	0,997	0,995	0,991
Фактический модуль упругости ($E_{ф}$), МПа	664	665	664	663	660
Показатель	Номер участка				
	6	7	8	9	10
Средневзвешенный балл ($B_{ср}$)	4,79	4,98	4,79	4,60	4,72
Коэффициент прочности ($K_{пр}$)	0,979	0,998	0,979	0,960	0,972
Фактический модуль упругости ($E_{ф}$), МПа	652	665	652	639	647
Показатель	Номер участка				
	11	12	13	14	15
Средневзвешенный балл ($B_{ср}$)	4,65	4,66	4,62	4,66	5,00
Коэффициент прочности ($K_{пр}$)	0,965	0,966	0,962	0,966	1,000
Фактический модуль упругости ($E_{ф}$), МПа	643	643	641	643	666
Показатель	Номер участка				
	16	17	18	19	20
Средневзвешенный балл ($B_{ср}$)	4,66	5,00	4,74	4,75	4,60
Коэффициент прочности ($K_{пр}$)	0,966	1,000	0,974	0,975	0,960
Фактический модуль упругости ($E_{ф}$), МПа	643	666	649	649	639

Для каждого характерного участка величина фактического модуля упругости $E_{ф}$ определяется по формуле:

$$E_{ф} = E_{общ} \cdot K_{пр}, \quad (2.3)$$

где $E_{\text{общ}}$ – общий расчетный модуль упругости, принятый равным 666 МПа в соответствии с проектной документацией [49].

Для количественной оценки вариабельности модуля упругости дорожной одежды были рассчитаны следующие статистические показатели: математическое ожидание ($\bar{E}(t)$); дисперсия ($D(t)$); стандартное отклонение ($\sigma(t)$); коэффициент вариации (c_E).

Результаты расчетов сведены в сводную Таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Числовые характеристики статистического распределения модуля упругости

Статистическая характеристика	Значение
Количество измерений, шт.	20
Математическое ожидание модуля упругости, МПа	652,71
Дисперсия	99,20
Стандартное отклонение	9,96
Коэффициент вариации	0,02

По данным, представленным в Таблицах 2.1 и 2.2, построен полигон частот распределения (Рисунок 2.3).

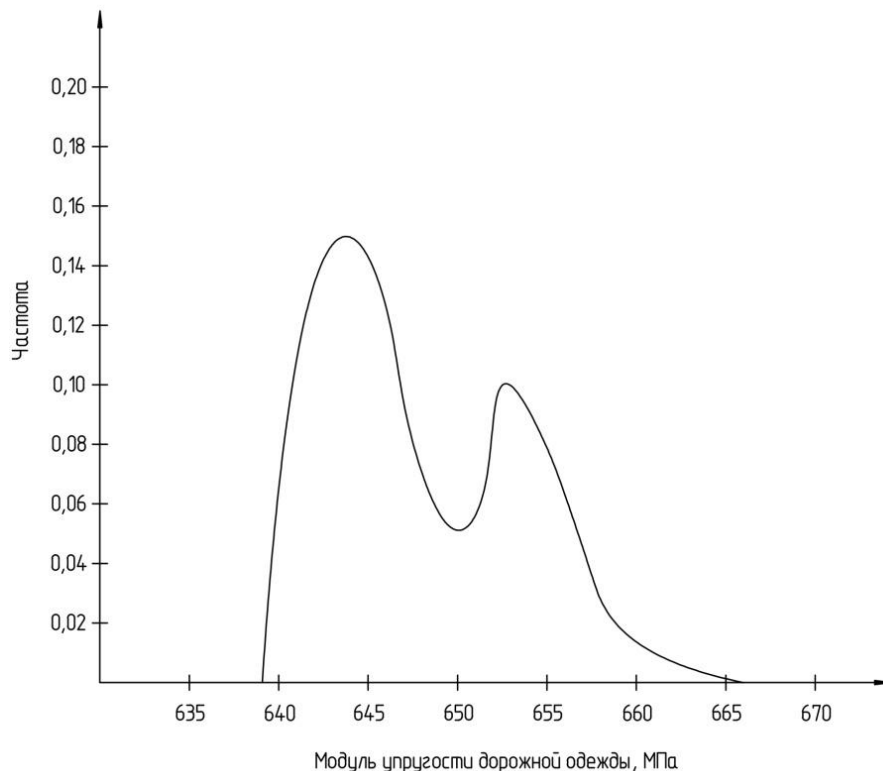


Рисунок 2.3 – Полигон частоты распределения упругости дорожной одежды

Доверительный интервал для математического ожидания модуля упругости при доверительной вероятности 95% ($\alpha = 0,05$) рассчитан с использованием квантиля распределения Стьюдента ($t = 2,093$) и составляет от 648,0 до 657,4 МПа. Коэффициент детерминации составил 0,75.

Скорость движения транспорта зависит в большей степени от ровности дорожного покрытия. Поэтому прогнозирование скорости тесно связано с прогнозированием ровности покрытий.

По результатам шестилетних наблюдений КаздорНИИ за автомобильными дорогами Казахстана была разработана математическая модель, описывающая динамику изменения ровности покрытия во времени:

$$S_t = S_0 \cdot \left[1 + c \cdot E_{\min}^d \cdot \left(n_p \cdot N_{\text{пр.1}} \cdot \frac{q^{t-1}}{q-1} \right)^{aE_{\min}^b} \right], \quad (2.4)$$

где S_0 – исходная ровность покрытия по показаниям толчкомера на момент приемки в эксплуатацию, см/км; E_{\min} – минимальное значение модуля упругости, обеспечиваемое с заданной надежностью и односторонней доверительной вероятностью, МПа.

В ходе шестилетних натурных исследований на дорогах Казахстана для капитальных дорожных одежд были получены значения параметров c , d , a , b с коэффициентом корреляции, превышающим 0,92:

$$c = 6,7 \cdot 10^9; d = -5,65; a = 0,02; b = -0,7.$$

Случайную величину E_{\min} в формуле (2.2) можно представить в виде:

$$E_{\min} = \bar{E}(t) - t_n \cdot \sigma_E(t) \quad (2.5)$$

или

$$E_{\min} = \bar{E}(t) \cdot (1 - t_n \cdot c_E), \quad (2.6)$$

где t_n – нормированное отклонение, соответствующее заданному уровню надежности; $\sigma_E(t)$ – стандартное отклонение модуля упругости, МПа; $c_E = \sigma_E(t)/\bar{E}(t)$ – коэффициент вариации модуля упругости, который служит относительной характеристикой оценки однородности дорожной одежды по прочности.

После установления зависимостей изменения модуля упругости дорожной одежды и ровности покрытия во времени появляется возможность прогнозировать вероятностное распределение скоростного режима, что позволяет перейти от контроля технических параметров к экономико-вероятностному управлению надежностью. В рамках такого подхода ключевым становится не само состояние покрытия, а допустимый риск снижения скорости ниже договорного уровня, оцениваемый на основе сформированной базы данных, которая связывает технические индикаторы с потенциальными потерями дохода концессионера.

Математические модели, описывающие динамику изменения скорости движения легковых автомобилей, представлены ниже [38]:

$$\bar{V}_1 = 581,7 \cdot \left\{ S_0 \cdot \left[1 + c \cdot E_{\min}^d \cdot \left(n_p \cdot N_{\text{пр.1}} \cdot \frac{q^{t-1}}{q-1} \right)^{aE_{\min}^b} \right] \right\}^{-0.48} - \Delta V, \quad (2.7)$$

$$V_{\max} = 753,4 \cdot \left\{ S_0 \cdot \left[1 + c \cdot E_{\min}^d \cdot \left(n_p \cdot N_{\text{пр.1}} \cdot \frac{q^{t-1}}{q-1} \right)^{aE_{\min}^b} \right] \right\}^{-0.48} - \Delta V. \quad (2.8)$$

Влияние интенсивности движения N (авт./сут) на скорость транспортного потока учитывается с помощью вводимого показателя ΔV , для 4-полосных дорог составляет:

$$\Delta V = 2 \cdot \left(\frac{N}{1000} \right)^{0,7} \cdot \beta^{0,9}, \quad (2.9)$$

где β – коэффициент, учитывающий состав транспортного потока, численно равный удельному весу грузовых автомобилей и автобусов ($\beta = 0,4 \dots 0,5$).

Проведенное исследование ровности дорожного покрытия базируется на инструментальных измерениях с помощью универсальной трехметровой рейки. Все испытания проводились на дорожном покрытии с сухой поверхностью, очищенной от грязи и посторонних предметов, что исключало влияние дополнительных факторов на результаты исследования.

Экспериментальная часть работы выполнена на автомобильной дороге трассы М-12 «Восток» на участке Дюртюли – Ачит (км 90 – км 140).

Для достижения репрезентативности данных исследования выбрано 30 стандартных участков дороги длиной по 100 м (Таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Результаты промеров

Место измерения	Величина просвета, мм				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
1	3	2	0	1	1
2	1	1	3	1	3
3	1	0	0	3	3
4	3	3	3	0	2
5	1	0	2	0	1
6	3	0	3	3	2
7	3	0	1	1	3
8	1	2	3	3	2
9	1	3	0	4	3
10	1	1	0	1	1
11	2	1	0	0	3
12	0	1	0	1	3
13	1	2	1	2	0
14	3	0	3	0	1
15	1	2	1	0	0
16	0	2	2	0	2
17	1	1	1	2	3
18	0	1	3	2	3
19	1	2	3	2	3
20	1	2	2	2	3
21	2	0	2	3	3
22	1	3	1	1	3
23	3	1	2	0	3
24	4	1	1	1	2
25	0	1	2	2	2
26	0	0	2	1	2
27	0	4	0	1	3
28	2	3	4	1	0
29	0	0	2	1	0
30	3	2	3	1	3

По результатам промеров были отобраны девять характерных участков с разной ровностью. На каждом из отобранных участков проводились замеры скорости движения легковых автомобилей и вычислены следующие статистические показатели (Таблица 2.4):

- математическое ожидание (\bar{V});
- стандартное отклонение (σ_v);
- коэффициент вариации (c_v);

– максимальная скорость с 5 % обеспеченности (V_{\max}).

Таблица 2.4 – Результаты эксперимента по установлению корреляционной связи «скорость – ровность»

№ участка	Скорость движения легковых автомобилей					Ровность (средняя величина просветов), мм
	Математическое ожидание (\bar{V}), км/ч	Стандартное отклонение (σ_v), км/ч	Коэффициент вариации (c_v)	Максимальная скорость с 5 % обеспеченности (V_{\max}), км/ч	Количество измерений	
1	99,4	5,35	0,05	115,00	50	1,4
2	98,74	4,62	0,05	109,67	50	1,8
4	87,64	2,89	0,03	97,33	50	2,2
5	106,48	6,75	0,06	119,00	50	0,8
7	95,68	4,35	0,05	107,67	50	1,6
11	103,64	6,44	0,06	117,67	50	1,2
12	108,74	7,90	0,07	124,67	50	1,0
20	92,94	4,90	0,05	110,00	50	2,0
29	109,86	9,21	0,08	125,33	50	0,6

Анализ данных, представленных в Таблице 2.4, показывает устойчивую взаимосвязь между ростом математического ожидания скорости и увеличением стандартного отклонения. В отличие от этого, коэффициент вариации остается относительно стабильным, демонстрируя колебания около среднего значения 0,06, что не позволяет установить определенную зависимость данного параметра от математического ожидания.

Обнаруженная закономерность роста стандартного отклонения вместе с увеличением средней скорости дополнительно подтверждается на Рисунке 2.4: на графике отображены кривые нормального распределения скоростей, зафиксированных на экспериментальных участках с различной степенью ровности покрытия.

Как следует из полученных данных, динамика скорости движения в зависимости от ровности покрытия описывается кривыми нормального распределения. Для максимальной скорости легковых автомобилей и средней скорости потока эти кривые имеют различную пологость, что обусловлено уменьшением стандартного отклонения при снижении математического

ожидания скорости. Согласно построенным моделям, разница между средней скоростью легкового транспорта (\bar{V}_1) и максимальной скоростью (V_{\max}) сокращается по мере ухудшения ровности дороги, что полностью подтверждается данными Рисунка 2.5.

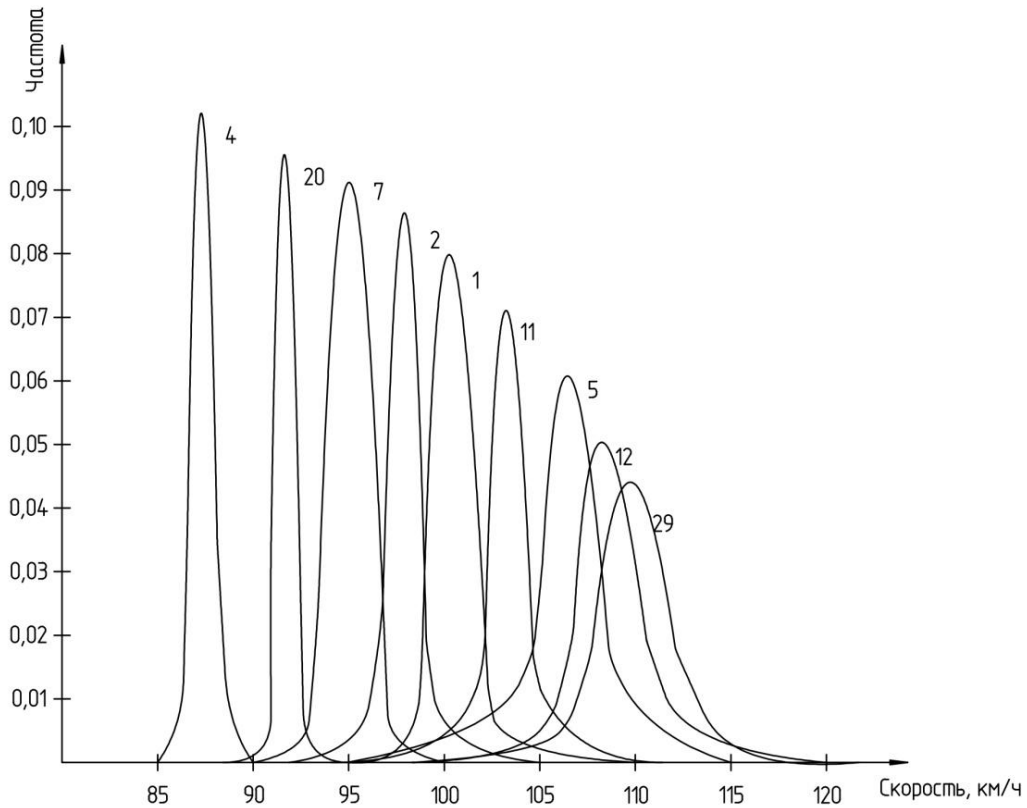


Рисунок 2.4 – Скорость движения легковых автомобилей, км/ч

На платной дороге требуется повысить надежность (доверительную вероятность) обеспечения нормативной средней скорости. Одним из способов управления параметрами случайных величин, характеризующих атрибутивные показатели дороги, является регулирование показателями однородности этих величин за счет параметров дисперсии.

С вероятностью 95% снижение скорости при увеличении ровности на 1 мм находится в интервале от 2,8 до 15,2 км/ч. Коэффициент детерминации составил 0,83.

Однако для платных дорог недостаточно задать единый уровень надёжности для всей трассы. Стоимость времени пользователя (value of time – VOT) различна для разных типов транспортных средств и участков.

Соответственно, экономические потери от снижения скорости на участке с высоким VOT значительно выше, чем на участке с низким VOT. Это обосновывает необходимость ранжирования участков по допустимому риску снижения скорости.

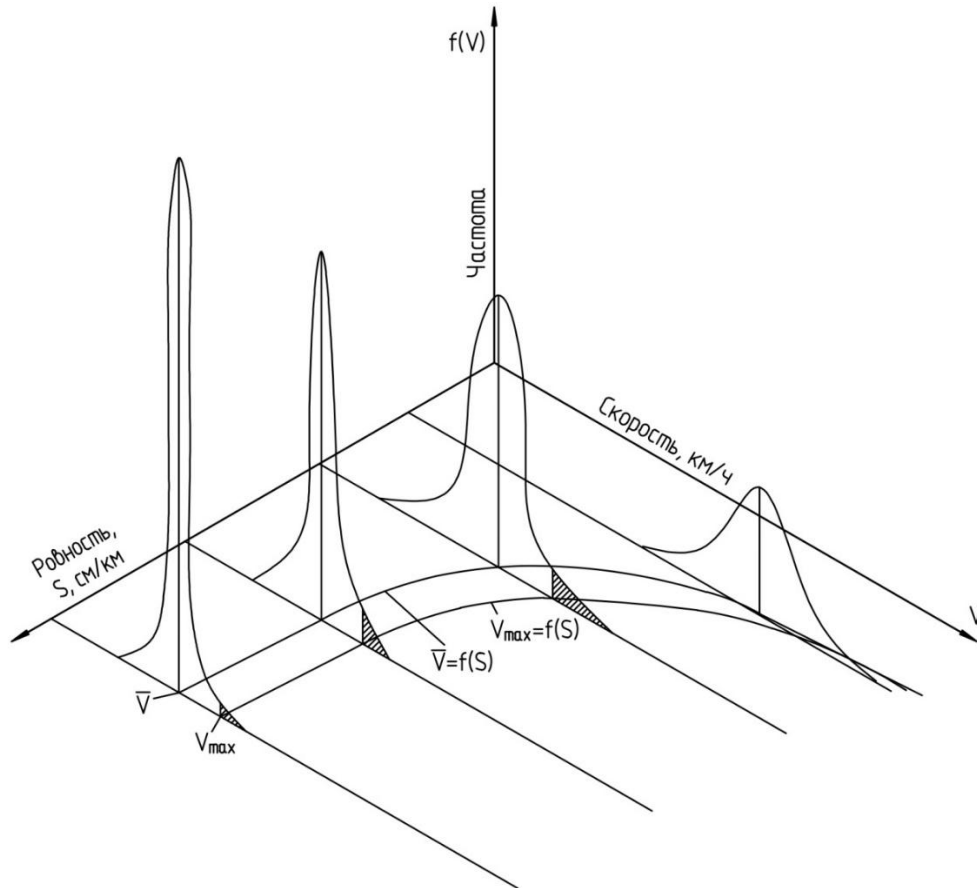


Рисунок 2.5 – Расчетная схема изменения максимальной и средней скорости движения легковых автомобилей и плотности распределения скорости в зависимости от ровности дорожного покрытия [38]

Существуют два основных подхода к определению VOT: эмпирический (основанный на опросах и выявленных предпочтениях пользователей) и расчетный (исходя из макроэкономических показателей). Для грузовых перевозок оценка стоимости времени может производиться более формализованно, на основе учета почасовой заработной платы водителя, амортизации, стоимости топлива, а также потенциальных издержек от заморозки оборотного капитала и потери качества перевозимых грузов.

Механизм связи стоимости времени с доходом концессионера основывается на следующих положениях:

- устанавливается целевой (концессионный) уровень скорости для каждого типа транспортного средства;

- на основе значений VOT рассчитывается величина потерь времени для пользователей при снижении фактической скорости ниже целевого уровня в денежном выражении;

- участки с высоким VOT генерируют более крутую функцию потерь дохода при отклонении скорости от концессионного уровня, что приоритизирует их при распределении ремонтных ресурсов.

- ранжирование участков производится путем расчета интегрального показателя – удельной стоимости времени для смешанного транспортного потока, взвешенной с учетом интенсивности движения разных категорий транспортных средств.

Реализация экономико-вероятностного подхода к управлению надежностью предполагает снижение коэффициента вариации скоростей в транспортном потоке, что позволяет уменьшить вероятность падения скорости ниже уровня, обеспечивающего платёжеспособный спрос. Как установлено [28; 38], на скоростной режим влияют геометрические параметры дороги (ширина дорожного полотна, продольные уклоны, радиусы кривых в плане), однако в рамках предлагаемой концепции они рассматриваются как инструменты управления допустимым риском. Варьируя эти параметры на этапе проектирования, можно целенаправленно снижать дисперсию скорости как случайной величины, тем самым сокращая долю ситуаций, в которых скорость опускается ниже экономически обоснованного порога. Игнорирование такой постановки приводит к риску потери доходов концессионера и затрудняет достижение целевых показателей коммерческой эффективности платного проекта.

Обеспеченность скоростного режима эксплуатируемой дороги определяют совокупностью коэффициентов обеспечения расчетной скорости K_{pc} [28; 38].

Коэффициент расчетной скорости – отношение фактической максимальной скорости движения одиночного легкового автомобиля, обеспеченной дорогой по условиям безопасности движения или взаимодействия автомобиля с дорогой на каждом участке ($v_{\text{фmax}}$), к расчетной скорости для данной категории дороги и рельефа местности (v_p):

$$K_{\text{рс}} = \frac{v_{\text{фmax}}}{v_p}. \quad (2.10)$$

Взаимосвязь между шириной укрепленного дорожного покрытия и достижением расчетной скорости движения исследуется с позиции концепции «ширина психологического коридора». Под этим определением подразумевается величина ширины дороги, которая формирует у водителя субъективное ощущение свободы маневра, косвенно влияя на выбор оптимальной траектории и скорости транспортного средства.

Уменьшение ширины дорожного покрытия сужает зону комфортного восприятия пространства у водителя. Это, в свою очередь, провоцирует снижение средней скорости транспортного потока. При этом зависимость между сужением полотна и падением скорости носит нелинейный характер и усиливается при росте интенсивности движения [21].

Для установления зависимости между шириной дорожного полотна и скоростью движения был спланирован и проведен натурный эксперимент на трассе М-12 «Восток» Казань – Екатеринбург на участке Дюртюли – Ачит (км 90 – км 140).

В сборе первичных данных использован метод визуального наблюдения. Он заключался в фиксации времени преодоления легковыми автомобилями заданных прямолинейных отрезков платной дороги с последующим расчетом их индивидуальной скорости.

Было выбрано четыре контрольных участка с различной стандартной шириной проезжей части:

– участок 1: ширина дорожного полотна: 8,00 м (две полосы движения по 3,75 м и одна обочина 0,5 м);

– участок 2: ширина дорожного полотна: 10,00 м (две полосы движения по 3,75 м и одна обочина 2,5 м);

– участок 3: ширина дорожного полотна: 13,75 м (три полосы движения по 3,75 м и одна обочина 2,5 м);

– участок 4: ширина дорожного полотна: 17,50 м (четыре полосы движения по 3,75 м и одна обочина 2,5 м).

Все измерения проводились в идентичных погодных условиях (сухое покрытие, хорошая видимость) и в один и тот же временной промежуток (дневное время, вне пиковой нагрузки) для обеспечения репрезентативности данных.

На основе массива индивидуальных скоростей для каждого участка были рассчитаны следующие статистические показатели: математическое ожидание (\bar{V}); дисперсия (D_v); стандартное отклонение (σ_v); коэффициент вариации (c_v).

Результаты расчетов сведены в сводную Таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Числовые характеристики статистического распределения скорости движения легкового автомобиля в зависимости от ширины дорожного покрытия

Статистическая характеристика	Участок дороги			
	1	2	3	4
Ширина дорожного полотна, м	8,00	10,00	13,75	17,50
Количество измерений, шт.	50	50	50	50
Математическое ожидание, км/ч	106,52	117,20	126,06	132,70
Дисперсия	4,05	21,52	25,50	32,09
Стандартное отклонение	2,01	4,64	5,05	5,66
Коэффициент вариации	0,02	0,04	0,04	0,04
Коэффициент детерминации	0,95	0,95	0,95	0,95
Доверительный интервал, км/ч	[98,6; 119,7]	[106,4; 122,5]	[117,2; 131,8]	[122,6; 146,3]

Полученный массив скоростных показателей служит основой для анализа зависимости от ширины дороги на различных участках. Полученные данные демонстрируют явную тенденцию к снижению скоростных показателей по мере сужения ширины дорожного полотна. Анализ данных, представленных в Таблице 2.5, также показывает взаимосвязь между ростом

математического ожидания скорости и увеличением стандартного отклонения.

Для количественной оценки зависимости был проведен корреляционно-регрессионный анализ. В качестве независимой переменной (x) выступала ширина дорожного полотна, а зависимой (y) – коэффициент расчетной скорости (Рисунок 2.6).

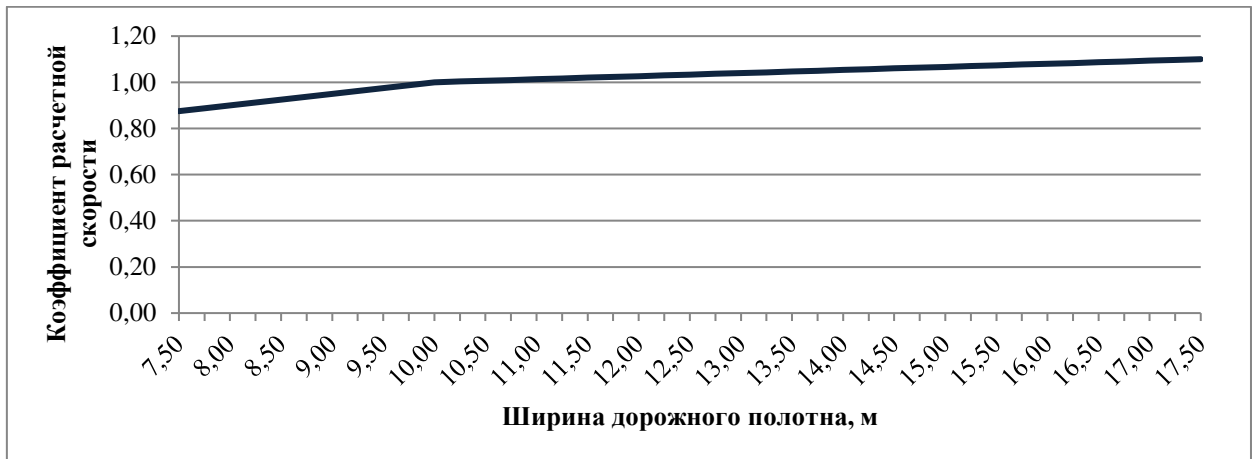


Рисунок 2.6 – Влияние ширины дорожного полотна на коэффициент обеспеченности расчетной скорости

Взаимосвязь между составом транспортного потока и обеспеченностью расчетной скорости обусловлена комплексом факторов, включая динамическое взаимодействие автомобилей. Поток соседних полос создает у водителя субъективное восприятие угрозы, что влияет на выбор скорости не только из-за боковых помех (учитываемых при проектировании ширины покрытия), но и из-за продольных конфликтов. Последние возникают при маневрах обгона, когда автомобили встречного направления временно пересекают полосу движения, усиливая нагрузку на психофизиологические реакции водителя.

Воздействие интенсивности и состава транспортного потока на возникновение продольных конфликтов в движении учитывается посредством введения поправочного коэффициента [21]:

$$\Delta K_{pc} = \frac{\varphi \alpha \beta N}{120}, \quad (2.11)$$

где φ – коэффициент, корректирующий влияние встречного транспорта на однополосных дорогах и транспортных средств на смежных полосах при многополосной организации движения;

α – коэффициент, отражающий уровень транспортной нагрузки на дорожное полотно;

β – коэффициент, характеризующий структурные особенности транспортного потока, определяется как отношение количества грузовых автомобилей к общему числу транспортных средств;

N – интенсивность движения, авт./сут.

Величина поправочного коэффициента (ΔK_{pc}), учитывающего структурные особенности транспортной нагрузки (доля легковых, грузовых автомобилей), варьируется в соответствии с графической зависимостью, представленной на Рисунке 2.7.

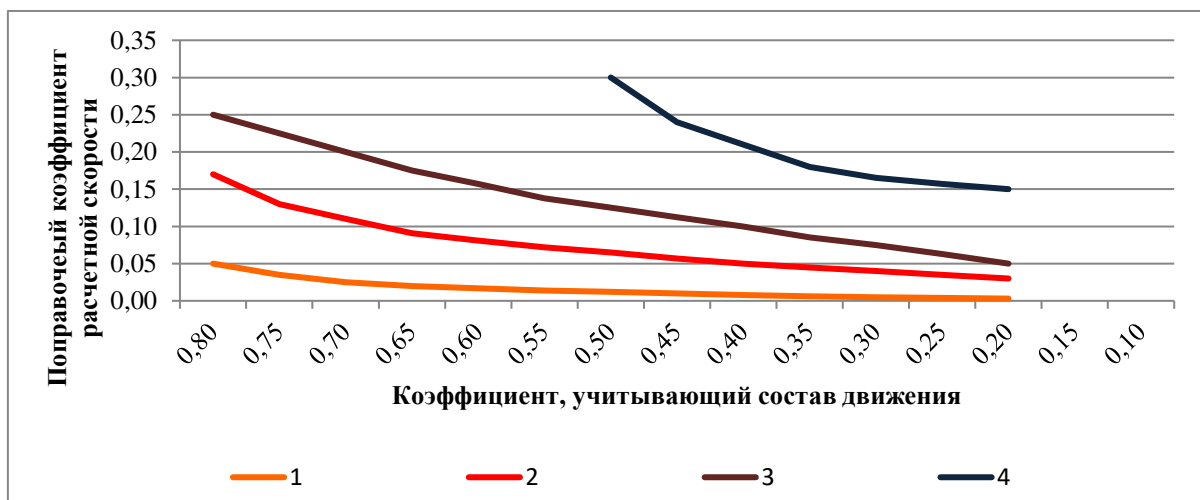


Рисунок 2.7 – Зависимость поправочного коэффициента (ΔK_{pc}) от интенсивности и состава движения: 1, 2, 3, 4 – интенсивность соответственно 1000, 3000, 5000, 10000 авт./сут [21]

Продольный уклон является неотъемлемым элементом профиля автомобильной дороги, напрямую влияющим на ее эксплуатационные характеристики. На платных трассах, где пользователи ожидают стабильно высокого уровня сервиса и минимального времени в пути, влияние уклона на скорость движения становится важным фактором.

Для установления зависимости между величиной продольного уклона и скоростью движения отдельных легковых автомобилей на платной автомагистрали был проведен натурный эксперимент на трассе М-12 «Восток» на участке Дюртюли – Ачит (км 90 – км 140).

На основании выполненной проектной документации [49] были выбраны четыре участка с различными продольными уклонами:

- участок 1: продольный уклон – 10 ‰;
- участок 2: продольный уклон – 20 ‰;
- участок 3: продольный уклон – 30 ‰;
- участок 4: продольный уклон – 40 ‰.

С целью обеспечения достоверности и репрезентативности полученных данных все измерения осуществлялись в идентичных условиях – в дневное время вне часов пик, при сухом покрытии и отсутствии ограничений видимости.

На основе массива индивидуальных скоростей для каждого участка были рассчитаны следующие статистические показатели: математическое ожидание (\bar{V}); дисперсия (D_v); стандартное отклонение (σ_v); коэффициент вариации (c_v). Результаты расчетов сведены в сводную Таблицу 2.6.

Таблица 2.6 – Числовые характеристики статистического распределения скорости движения легкового автомобиля в зависимости от продольного уклона

Статистическая характеристика	Участок дороги			
	1	2	3	4
Величина продольного уклона, ‰	10,00	20,00	30,00	40,00
Количество измерений, шт.	50	50	50	50
Математическое ожидание, км/ч	134,74	130,54	122,56	98,74
Дисперсия	18,47	13,77	19,85	5,23
Стандартное отклонение	4,30	3,71	4,45	2,29
Коэффициент вариации	0,03	0,03	0,04	0,02
Коэффициент детерминации	0,87	0,87	0,87	0,87
Доверительный интервал, км/ч	[113,1 ; 164,9]	[110,5 ; 144,4]	[98,9 ; 132,8]	[78,4 ; 130,2]

Проведенный анализ скоростного режима на участках с разными продольными уклонами показал устойчивую направленность к снижению

скорости при увеличении продольного уклона. Результаты обработки данных Таблицы 2.6 подтверждают выявленную ранее закономерность: более высоким значениям средней скорости соответствуют увеличенные показатели стандартного отклонения. Количественная оценка данной зависимости, выполненная методом корреляционно-регрессионного анализа, установила связь между независимой переменной – продольным уклоном (x) и зависимой – коэффициентом расчетной скорости (y), Рисунок 2.8.



Рисунок 2.8 – Зависимость коэффициента расчетной скорости от продольного уклона

На безопасность и скорость дорожного движения также влияет радиус кривой в плане. С целью выявления взаимосвязи между радиусами кривых в плане и скоростью легкового транспорта на платной автомагистрали М-12 «Восток» (участок Дюртюли – Ачит, км 90 – км 140) были организованы натурные наблюдения. В соответствии с проектной документацией [49] для исследования были выбрано пять контрольных участков с различными радиусами: 810, 1200, 1500, 2500 и 3000 м.

Для получения достоверных и репрезентативных данных все замеры проводились в стандартизированных условиях: в дневное время вне часов пик, при сухом дорожном покрытии и хорошей видимости. На основе собранных данных о скоростях движения для каждого участка были вычислены статистические показатели: среднее математическое ожидание (\bar{V}); дисперсия (D_v); стандартное отклонение (σ_v); коэффициент вариации (c_v). Итоги расчетов представлены в сводной Таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Числовые характеристики статистического распределения скорости движения легкового автомобиля в зависимости от радиуса кривой в плане

Статистическая характеристика	Участок дороги				
	1	2	3	4	5
Радиус кривой в плане, м	810,00	1200,00	1500,00	2500,00	3000,00
Количество измерений, шт.	50	50	50	50	50
Математическое ожидание, км/ч	87,54	101,04	118,04	136,28	140,70
Дисперсия	34,13	26,24	44,76	44,96	47,97
Стандартное отклонение	5,84	5,12	6,69	6,71	6,93
Коэффициент вариации	0,07	0,05	0,06	0,05	0,05
Коэффициент детерминации	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
Доверительный интервал, км/ч	[78,1 ; 108,0]	[90,5 ; 114,2]	[99,4 ; 119,7]	[120,9 ; 146,0]	[128,5 ; 162,3]

Проведенный анализ скоростных характеристик демонстрирует тенденцию к снижению скорости транспортных средств по мере возрастания уменьшения радиуса кривой в плане. Статистическая значимость данной зависимости была подтверждена корреляционно-регрессионным анализом, который выявил зависимость между радиусом кривой, выступавшим в качестве переменной (x), и коэффициентом расчетной скорости как переменной (y), что графически отображено на Рисунке 2.9.

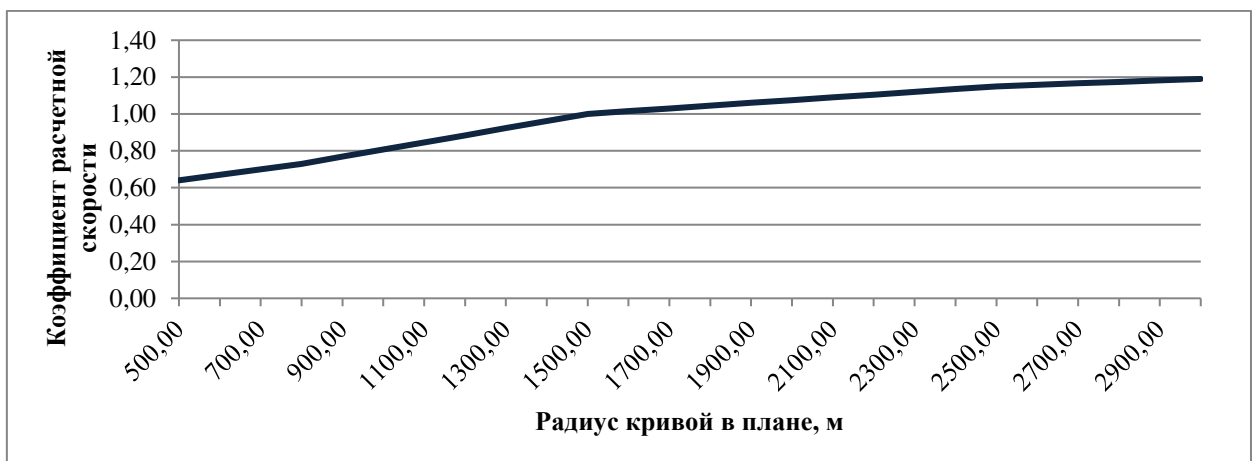


Рисунок 2.9 – Зависимость коэффициента расчетной скорости от радиуса кривой в плане

На основе выполненных исследований определены факторы и степень влияния параметров дорожной одежды и геометрических параметров дороги

на скорости транспортного потока. Однако в рамках экономико-вероятностного управления надёжностью ключевое значение имеют не сами эти параметры, а допустимый риск снижения скорости, который они порождают. С изменением условий движения и нагрузок меняется и экономическая значимость этого риска, что требует не просто корректировки технических нормативов, а пересмотра пороговых значений риска, исходя из баланса затрат на содержание и потенциальных потерь дохода концессионера. Создание банков дорожных данных, систематическая диагностика и накопление статистической информации о состоянии элементов сооружения и факторах окружающей среды служат основой не для простого повышения скоростного режима, а для обоснованного управления рисками, позволяя ранжировать участки по приоритетности вмешательства с учётом их экономической значимости.

Рассмотрим применение методов параметрического моделирования в рамках экономико-вероятностного управления надёжностью применительно к платной автомобильной дороге М-12 «Восток» на участке Дюртюли – Ачит (км 90 – км 140) I технической категории. Интенсивность движения принята 9360 авт./сут (согласно Разделу 2.2). Параметрическое моделирование используется для оценки того, как изменение технических параметров (модуля упругости, ровности) трансформируется в вероятностное распределение скоростей и, соответственно, в уровень допустимого риска снижения скорости, влияющего на платёжеспособный спрос и доходность концессионера.

При проектировании дороги нормативный уровень надёжности для этой категории составляет 0,98 [49]. Нормированное отклонение при этом уровне надёжности по таблицам плотности распределения Лапласа составит 2,33, и формула (2.6) примет вид:

$$E_{\min} = \bar{E}(t) \cdot (1 - 2,33 \cdot c_E). \quad (2.12)$$

Поскольку при строительстве платной дороги поставлена цель повысить надёжность обеспечения нормативной средней скорости, примем

значение надежности 0,99. При повышении доверительного интервала (уровня надежности) до 0,99 t_n составит 2,58, а значение E_{\min} будет определяться как:

$$E_{\min} = \bar{E}(t) \cdot (1 - 2,58 \cdot c_E). \quad (2.13)$$

При заданном значении E_{\min} и уровне надежности 0,99 необходимо скорректировать проектные параметры дорожной одежды, руководствуясь расчетными моделями и нормативами. Особое внимание следует уделить регулированию геометрических параметров дорожных элементов для повышения однородности скоростей транспортного потока.

По результатам вычислений, выполненных по формуле (2.7), была получена динамика, описывающая изменение скоростей движения легковых автомобилей во времени (Рисунок 2.10).

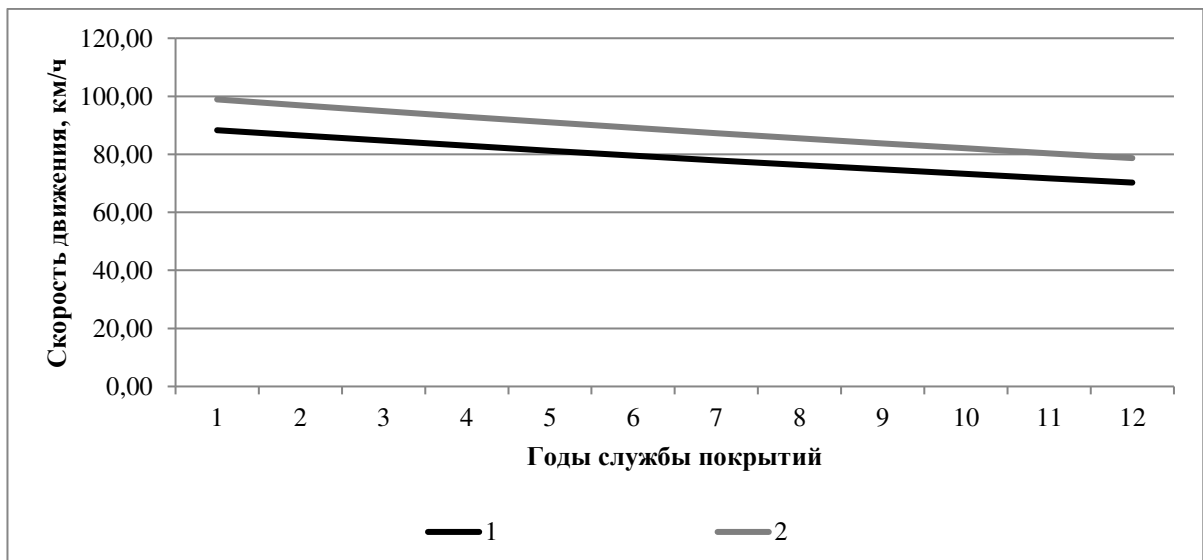


Рисунок 2.10 – Изменение скорости движения легкого автомобиля при различном уровне надежности: 1 – при нормативном уровне надежности 0,98; 2 – при нормативном уровне надежности 0,99

Полученные данные демонстрируют, что повышение уровня надежности оказывает комплексное влияние на динамику изменения скоростей движения легковых автомобилей во времени. При введении повышенного уровня надежности потребуются также корректировка параметров дороги.

Переход к реализации предиктивной методики управления транспортно-эксплуатационными параметрами, основанной на квантильной оценке рисков (VaR – Value at Risk) снижения скорости ниже уровня, установленного концессионным соглашением, требует опоры на достоверные и актуализированные математические модели.

В рамках квантильной методики VaR под «потерями» следует понимать снижение фактической скорости движения транспортного потока относительно целевого (концессионного) уровня, зафиксированного в соглашении о создании и эксплуатации платной автомобильной дороги. Случайную величину «потеря скорости» следует определять как разность между целевой и фактической скоростями при условии, что фактическая скорость оказывается ниже целевой.

Статистическая обработка натурных измерений скорости на платной автомагистрали М-12 «Восток» на участке Дюртиули – Ачит (км 90 – км 140) показывает, что распределение мгновенных скоростей легковых автомобилей на однородном участке с фиксированными дорожными условиями с высокой степенью достоверности аппроксимируется нормальным законом. Параметры этого распределения – средняя скорость и среднеквадратическое отклонение – изменяются во времени под воздействием ряда факторов: ухудшения ровности дорожного покрытия, снижения модуля упругости дорожной одежды, изменения интенсивности и состава движения, а также погодных-климатических условий. Соответственно, распределение потерь скорости (как линейное преобразование нормального распределения) также является нормальным, но с параметрами, зависящими от текущего технического состояния дороги.

Для перехода от технических потерь (снижения скорости) к экономическим потерям концессионера вводится функция ущерба. В основе этой функции лежит зависимость платежеспособного спроса от средней скорости движения. Эмпирически установлено, что при снижении скорости ниже договорного уровня часть пользователей отказывается от проезда по

платной магистрали, переключаясь на бесплатные альтернативные маршруты. Данная зависимость имеет нелинейный характер и описывается логистической кривой: при незначительном отклонении скорости от целевого значения спрос снижается медленно, однако при превышении некоторого порога (определяемого ценностью времени пользователя) падение спроса становится резким. Функция ущерба представляет собой произведение интенсивности движения, протяжённости участка, величины платы за проезд и доли потерянного спроса, выраженной через логистическую функцию от скорости. Таким образом, каждому значению скорости ставится в соответствие ожидаемый экономический ущерб в виде недополученного дохода за единицу времени.

На основе полученного распределения потерь скорости и функции ущерба строится квантильная мера риска VaR. Для заданного доверительного уровня VaR для потери скорости есть такое пороговое значение, что с указанной вероятностью фактическое снижение скорости не превысит эту величину. Аналогично VaR для экономических потерь определяет максимальные ожидаемые потери дохода, которые не будут превышены с заданной доверительной вероятностью. Использование двух типов квантилей, технической и экономической, позволяет одновременно контролировать как физическую доступность скоростного режима, так и финансовые последствия его нарушения.

Полученные зависимости между геометрическими параметрами, состоянием покрытия и скоростным режимом создают основу для установления вероятностной связи между техническими индикаторами и распределением скоростей, что позволяет количественно оценить упущенную выгоду (потерю дохода) от недоремонта. Однако практическое применение этих моделей для долгосрочного планирования содержания и ремонта невозможно без процедуры экспериментальной верификации и калибровки в реальных условиях эксплуатации.

В ходе исследований подлежат оценке следующие группы взаимосвязанных параметров: характеристики транспортных потоков (интенсивность, скорость, состав), показатели физико-механического состояния дорожной одежды (прочность, ровность). На Рисунке 2.11 приведена обобщенная блок-схема (рабочий план), регламентирующая этапы информационно-технологического сопровождения процесса калибровки и верификации моделей.

Для эффективного управления современной сетью платных автомобильных дорог необходимо ориентироваться не на ликвидацию деформаций, а прогнозировать и предупреждать снижение эксплуатационных характеристик дороги. Основу такой методики составляет предиктивная аналитика, которая на основе данных мониторинга и математического моделирования оценивает остаточный ресурс объектов и оптимизирует график проведения ремонтов. При этом успешность внедрения подобных систем напрямую обусловлена наличием развитой нормативной базы, регламентирующей не только целевые показатели состояния дорожного полотна, но и стандарты сбора информации, методики её обработки и алгоритмы для принятия управленческих решений.

Использование априорной информации об геометрических параметрах для принятия решений в области содержания, организации движения и ценообразования, направленных на минимизацию дисперсии скоростей и обеспечение целевого уровня надежности должно включать предиктивное ранжирование участков по критичности. На основе установленных количественных зависимостей (Рисунки 2.6, 2.8, 2.9) каждый километр платной дороги получает «геометрический паспорт скорости» – потенциальную максимальную скорость при идеальном покрытии. В процессе эксплуатации фактические замеры скорости сопоставляются с этими эталонными значениями. Участки, где фактическая скорость устойчиво ниже геометрически-обусловленной, получают приоритет для диагностики покрытия или корректировки режимов движения.

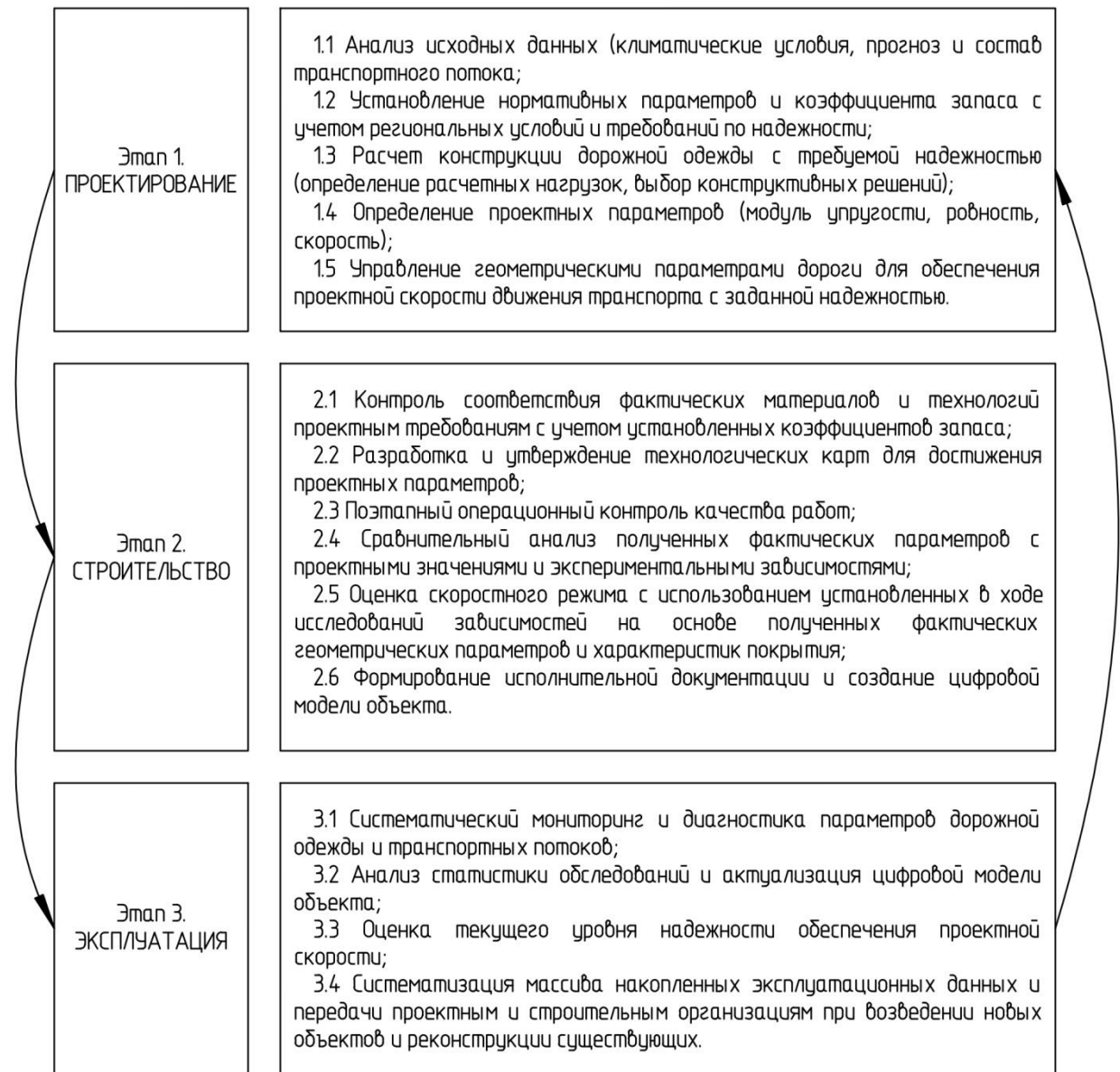


Рисунок 2.11 – Методика повышения надежности скоростного режима на этапах жизненного цикла объекта

Предлагаемая структура строится по четырехуровневому принципу, где каждый уровень решает свои задачи и предоставляет информацию для следующего (Рисунок 2.12).

Все управленческие воздействия, направленные на обеспечение повышения надежности скоростного режима платной автомагистрали, можно разделить на три категории согласно этапу жизненного цикла дороги и характеру принимаемых решений: проектные, эксплуатационные и организационно-экономические. Такое разделение необходимо для

корректной интерпретации разработанных моделей и методик, а также для определения границ ответственности при внедрении результатов работы.

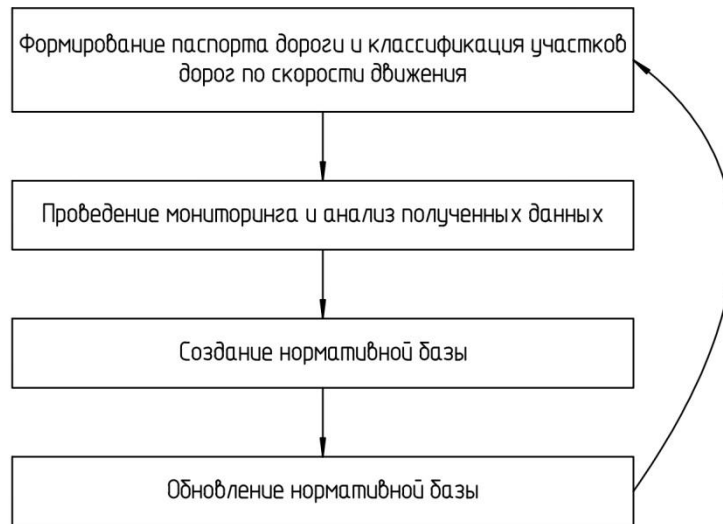


Рисунок 2.12 – Структура нормативной базы в процессе диагностики

Проектные решения принимаются на стадии разработки технической документации и в период текущей эксплуатации не изменяются без проведения реконструкции, к ним относятся:

- выбор геометрических параметров трассы в соответствии с зависимостями, установленными;
- задание конструкции дорожной одежды и требований к модулю упругости и ровности на момент ввода дороги в эксплуатацию.

Эксплуатационные решения реализуются в процессе содержания дороги и могут оперативно корректироваться по данным мониторинга. Они направлены на поддержание проектных характеристик в течение жизненного цикла. К ним в диссертации относятся:

- управление ровностью и прочностью покрытия с помощью параметрических моделей, позволяющих прогнозировать снижение модуля упругости и рост неровностей во времени, на основе прогноза назначаются сроки и объёмы ремонтных работ (текущий ремонт, капитальный ремонт);
- корректировка скоростных ограничений на участках с неблагоприятными геометрическими параметрами при ухудшении погодных условий или состояния покрытия.

Организационно-экономические решения связаны с тарифной политикой и способами взаимодействия с пользователями. Они определяют коммерческую эффективность проекта и качество сервиса, к ним относятся:

- выбор системы взимания платы: традиционная барьерная система или бесконтактная система «Свободный поток» (см. Главу 3);
- установление тарифов и способов оплаты.

2.2 Оценка надежности обеспечения скоростного режима в зависимости от интенсивности движения

В настоящее время автомобильная дорога рассматривается как сложная инженерная система, главным свойством которой является надежность. Надежность автомобильной дороги представляет собой ее способность сохранять требуемые транспортно-эксплуатационные показатели в установленных условиях и на протяжении всего проектного срока службы [54; 60; 68].

Надежность дороги как сложной системы формируется под воздействием целого комплекса факторов, среди которых важным является интенсивность движения. Постоянное циклическое воздействие колес автомобилей является основной причиной накопления остаточных деформаций в дорожной одежде, а рост интенсивности приводит к ускоренному снижению прочности дорожных одежд и к последующему росту темпов разрушения [44].

Интенсивность движения является не просто статистическим показателем нагрузки на дорогу, а основным фактором, определяющим вероятностный характер возникновения отказов в работе дороги как системы. Под «отказами» в данном контексте понимается не только физическое разрушение покрытия, но и снижение пропускной способности, образование заторов и снижение скорости движения.

Математическое моделирование выступает ключевым методом исследования автомобильных потоков, что обусловлено наличием множества

сложноформализуемых факторов, влияющих на движение. В рамках данного подхода принято выделять два основных класса моделей: детерминистические и вероятностные (стохастические). Первые позволяют точно определить изменение параметров системы, в то время как вторые учитывают элемент случайности. Детерминистические модели, часто именуемые динамическими, применяются для описания как микроскопического взаимодействия автомобилей, так и макроскопической динамики потока в целом. Значительный вклад в развитие этой научной области внесли такие исследователи, как В. В. Сильянов [59], М. С. Лобанов [55], В. А. Черепанов [67].

Основное влияние на режим движения интенсивность оказывает на горизонтальных участках [59]. Анализ возможности применения различных теоретических моделей для моделирования транспортных потоков на прямых участках четырехполосных и шестиполосных дорог показал, что все они имеют ограниченную область применения, определяемую конкретными диапазонами интенсивности движения.

Статистическая обработка данных натурных наблюдений на платной автомобильной дороге М-12 «Восток» на участке Дюртюли – Ачит (км 90 – км 140) выявила характерные особенности распределения скоростей движения в зависимости от интенсивности транспортного потока (Рисунок 2.13).

Результаты обработки наглядно демонстрируют, как меняется характер распределения скоростей по мере роста интенсивности движения. При низкой интенсивности движения, когда взаимодействие между транспортными средствами минимально, распределение скоростей является асимметричным и имеет значительный разброс. Это свидетельствует о неоднородном составе потока и свободе выбора скорости каждым водителем в зависимости от индивидуальных предпочтений и технических характеристик автомобиля.

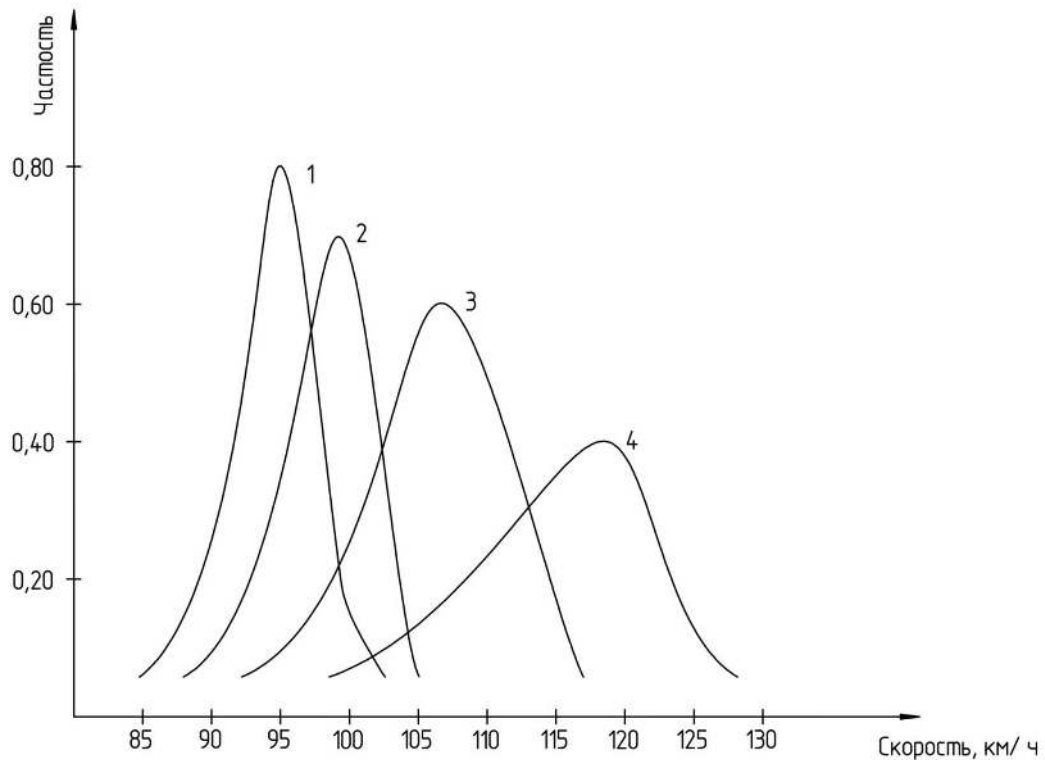


Рисунок 2.13 – Распределения скоростей движения в зависимости от интенсивности транспортного потока: 1 – $N=600$ авт./ч; 2 – $N=500$ авт./ч; 3 – $N=400$ авт./ч; 4 – $N=300$ авт./ч

По мере увеличения интенсивности движения распределение скоростей приобретает ярко выраженную симметричную, колоколообразную форму, статистически близкую к нормальному распределению.

Следствием данного изменения является резкое сокращение вариации скоростей. Дисперсия и стандартное отклонение существенно уменьшаются, что визуально проявляется в сужении и «вытягивании» кривой распределения вверх. В условиях высокой интенсивности свобода маневра и выбора скорости для каждого отдельного транспортного средства ограничивается уровнем плотности движения. В результате поток «стабилизируется», двигаясь с близкими, взаимно обусловленными скоростями, что и приводит к наблюдаемому снижению разброса и формированию нормального распределения.

Для выявления зависимости снижения скорости от роста интенсивности движения был построен график «скорость – интенсивность», который характеризуется нелинейной (криволинейной) формой. Положение

точек перегиба на данной кривой соответствует границам, разделяющим различные качественные состояния транспортного потока (Рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 – Зависимость «скорость – интенсивность»

Анализ кривой выявил наличие трех статистически значимых участков, разделенных точками перегиба:

1. Участок свободного движения (до 200 авт./ч) характеризуется незначительным снижением скорости при росте интенсивности. На этом этапе взаимодействие между транспортными средствами минимально, а скорость движения определяется преимущественно дорожными условиями и ограничениями.

2. Участок отличается существенным нелинейным снижением скорости (свыше 200 и до 500 авт./ч). На этом этапе наблюдается усиление взаимодействия между транспортными средствами.

3. Участок насыщенного потока (свыше 500 авт./ч) характеризуется резким уменьшением скорости при незначительном изменении интенсивности. На этом этапе поток движется в связанном состоянии с высокой степенью взаимодействия между транспортными средствами.

Развитие и модернизация транспортной инфраструктуры, в частности ввод в эксплуатацию платных автомагистралей, наряду с социально-экономическими и градостроительными преобразованиями, оказывают комплексное воздействие на структуру транспортного спроса. Меняется не только общее количество передвижений, но и их целевая направленность,

средняя дальность, загрузка разных видов транспорта, а также выбор маршрутов следования.

Статистические данные за 2024 г. свидетельствуют о росте интенсивности движения на платных дорогах: объем проездов достиг 379 млн, что на треть превышает показатель предыдущего года.

Статистика магистрали М-12 «Восток» свидетельствует о тенденции роста интенсивности движения. В первый год работы трассы на участке Москва – Казань зафиксировано более 27 млн автомобилей. Среднесуточная интенсивность движения транспортных средств за год возросла с 6 до 10 тыс., достигая в пиковые периоды 15 тыс. Наиболее загруженными оказались подмосковные участки (до 62 тыс. авт./сут), тогда как в Татарстане пиковая интенсивность составила более 17 тыс. автомобилей в сутки [47].

В рамках экономико-вероятностного управления надёжностью платных автомобильных дорог в качестве исходного параметра, определяющего допустимый риск снижения скорости, учтена интенсивность движения. Это позволяет не абстрактно повышать надёжность, а дифференцировать требования к техническому состоянию в зависимости от того, насколько интенсивность потока усиливает экономические последствия от возможного снижения скоростного режима.

В основу исследования положен метод визуального наблюдения и фиксирования количества транспортных средств, проходящих по платной автомагистрали М-12 «Восток» (участок Дюртюли – Ачит, км 90 – км 140), с последующей статистической обработкой данных.

В характере изменения интенсивности движения в течение суток фиксируются сглаживание пиковых нагрузок и отсутствие резких колебаний интенсивности (Рисунок 2.15).

В утренние часы отмечается плавный рост интенсивности движения, достигающий максимума к 9:00, что связано с началом рабочего дня и массовым выездом транспортных средств. В период с 9:00 до 18:00

наблюдается стабилизация транспортного потока, затем фиксируется постепенное снижение интенсивности.

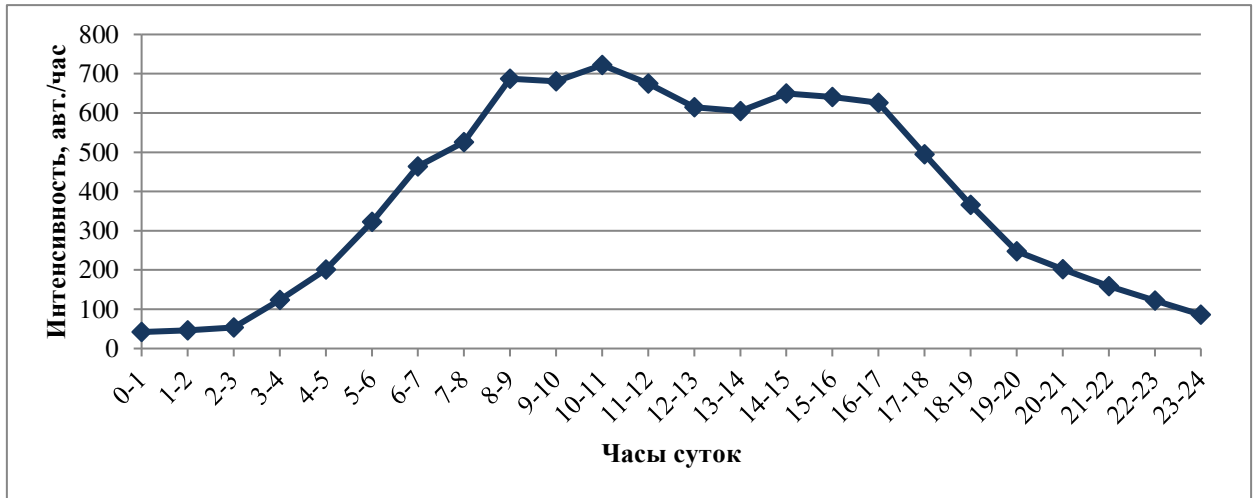


Рисунок 2.15 – Изменение интенсивности движения в течение суток

Динамика транспортного потока в течение недели не имеет выраженного характера, однако в среду отмечается некоторое увеличение нагрузки на дорожную сеть (Рисунок 2.16).

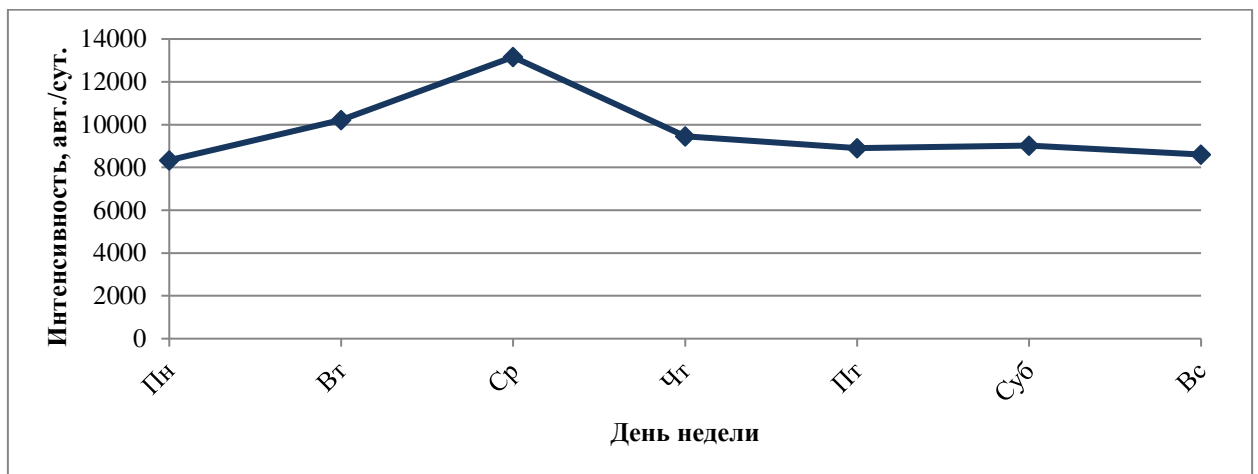


Рисунок 2.16 – Изменение интенсивности движения в течение недели

Точность определения интенсивности движения при краткосрочных наблюдениях напрямую определяется стабильностью транспортного потока в период проведения замеров. Для обоснования временных интервалов наблюдения выполнен анализ динамики изменения коэффициентов вариации в рамках суточного и недельного циклов (Рисунки 2.17, 2.18).

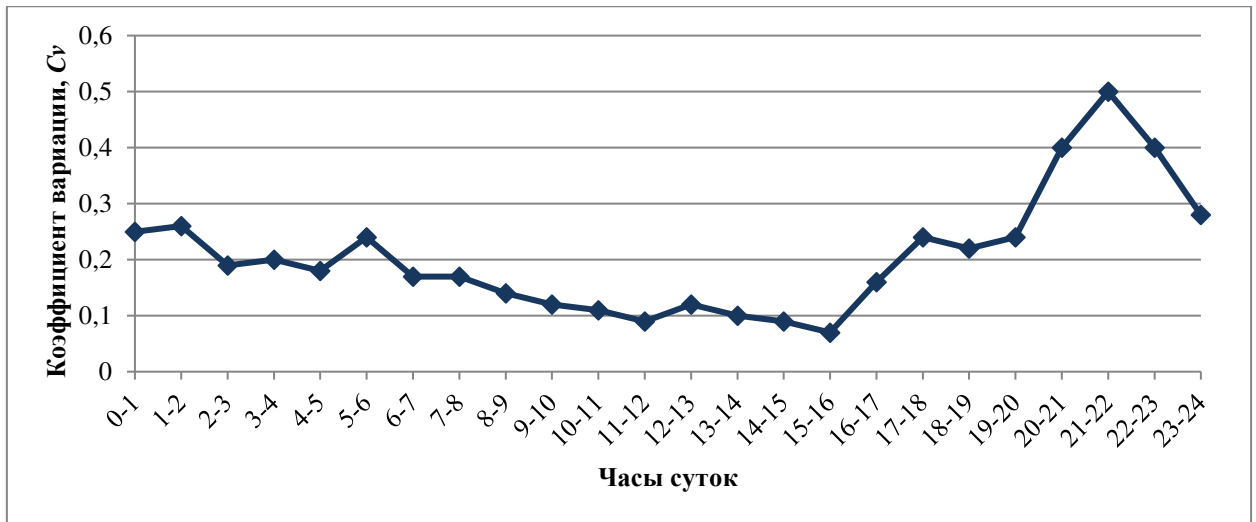


Рисунок 2.17 – Изменение коэффициента вариации в течение суток

Анализ суточной динамики коэффициента вариации демонстрирует, что временной промежуток с 8:00 до 16:00 является оптимальным для организации наблюдений, поскольку в указанные часы транспортный поток характеризуется наибольшей стабильностью. Для проведения часовых замеров рекомендуется выбирать период с 10:00 до 16:00.

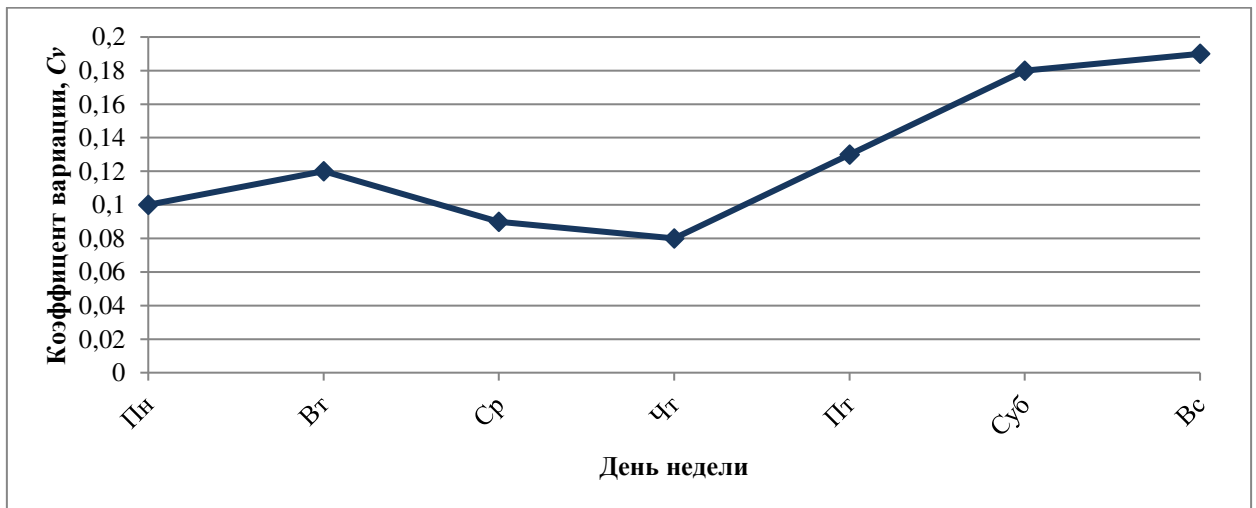


Рисунок 2.18 – Изменение коэффициента вариации в течение недели

Анализ динамики коэффициента вариации соотношения суточной интенсивности движения по дням недели со средненедельным значением демонстрирует оптимальность проведения наблюдений во вторник, среду и четверг. В указанные дни коэффициент вариации достигает минимальных

значений в диапазоне 0,08–0,12, что свидетельствует о высокой стабильности транспортного потока.

Для определения среднесуточной интенсивности движения транспортных средств были выбраны данные, полученные в течение шести дней (вторник, среда, четверг) во временном интервале с 8:00 до 14:00, что позволило зафиксировать характерные закономерности формирования транспортных потоков в период стабильной нагрузки. Результаты представлены в Таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Результаты визуального учета интенсивности и состава движения

Время проведения измерений	Ноябрь					
	Вторник	Среда	Четверг	Вторник	Среда	Четверг
	8:00–12:00	8:00–12:00	8:00–12:00	12:00–14:00	12:00–14:00	12:00–14:00
Тип транспорта	Количество транспортных средств					
Легковые автомобили	1127	1192	1162	503	508	545
Двухосные грузовые автомобили	134	111	105	56	62	64
Трехосные грузовые автомобили	42	43	30	26	21	30
Четырехосные грузовые автомобили	162	190	152	99	17	97
Пятиосные грузовые автомобили	356	360	384	196	81	176
Приведенная интенсивность к легковому автомобилю	2722	2826	2745	1381	895	1384
Среднегодовая суточная интенсивность движения, авт./сут	9155	9505	8494	11 285	7313	10 404
Среднее значение интенсивности движения, авт./сут	9360					

Среднегодовая суточная интенсивность движения для каждой i -й группы транспортных средств определялась согласно ГОСТ 32965-2014 «Методы учета интенсивности движения транспортного потока» по формуле:

$$N_{cc} = \sum_{1}^{n} N_i \cdot K_{ч} \cdot K_{д} \cdot K_{м}, \quad (2.14)$$

где N_i – количество транспортных средств i -й группы, авт.; $K_{\text{ч}}$ – коэффициент часа; $K_{\text{д}}$ – коэффициент дня; $K_{\text{м}}$ – коэффициент месяца; n – количество групп.

Анализ данных об интенсивности и составе движения показал, что, в отличие от данных проектной документации – 15 119 авт./сут [49], фактическая интенсивность оказалась ниже и составила 9360 авт./сут.

Проведенный анализ стабильности транспортных потоков дает основание предложить следующие рекомендации по срокам и продолжительности наблюдений за интенсивностью и составом движения в зависимости от конкретных задач. Рекомендуемая продолжительность наблюдений за интенсивностью движения составляет: не менее двух часов в понедельник, вторник, среду и четверг; не менее четырех часов – в пятницу, субботу и воскресенье. Проведение замеров в утренние часы следует исключить.

2.3 Основные выводы по Главе 2

На основе проведенных натурных исследований и статистического анализа получены следующие результаты:

1. Установлены количественные зависимости скорости от геометрических параметров дороги для платной магистрали: увеличение ширины с 8,00 до 17,50 м приводит к росту скорости с 106,5 до 132,7 км/ч; рост продольного уклона с 10 до 40 ‰ приводит к снижению средней скорости с 134,7 до 98,7 км/ч; увеличение радиуса с 810 до 3000 м ведет к росту скорости с 87,5 до 140,7 км/ч.

2. Выявлены закономерности влияния интенсивности движения на скоростной режим:

– при свободном движении распределение скоростей является асимметричным и имеет широкий разброс. По мере роста интенсивности распределение становится более симметричным, приближаясь к

нормальному закону, при этом разброс значений скорости существенно уменьшается.

– зависимость «скорость – интенсивность» характеризуется тремя четко выраженными фазами: свободного движения, нестабильного потока и насыщенного потока, при котором наблюдается значительное снижение скорости.

3. Выявлены временные интервалы с максимальной стабильностью транспортного потока (10:00–16:00 в суточном цикле, вторник – четверг в недельном цикле) на платных дорогах.

ГЛАВА 3. ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПУНКТОВ ВЗИМАНИЯ ПЛАТЫ КАК ФАКТОРА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА

На платных автомобильных дорогах для обеспечения взимания платы за проезд оборудуются специализированные зоны контроля – пункты взимания платы. Данные элементы инфраструктуры выполняют функцию пропускных узлов, через которые осуществляется перемещение транспорта, совмещая сбор средств с организацией транзита.

Пункты взимания платы должны обеспечивать:

- оперативное и бесперебойное взимание платы с пользователей без задержек;
- соответствие пропускной способности ПВП планируемой загруженности трассы, исключая образование заторов;
- минимизацию остановок и времени ожидания транспортных средств за счёт автоматизации процессов;
- предотвращение несанкционированного въезда на платную трассу через мониторинг и блокировку нелегальных точек доступа;
- объединение мультимедийных платежных систем (электронные терминалы, мобильные приложения, транспондеры) для гибкости оплаты;
- соблюдение экологических стандартов (шумоподавление, минимизация выбросов) и создание безопасных условий труда для персонала;
- компактное размещение в соответствии с архитектурно-планировочными нормами, без избыточного использования территории.

Проектирование пунктов взимания платы должно осуществляться как неотъемлемый элемент создания новой платной автодороги или включаться в документацию при переводе действующей трассы в платную. Разработка ПВП базируется на техническом задании (ТЗ), которое формируется с учётом следующих параметров: количество и тип ПВП (стационарные, мобильные, автоматизированные); их месторасположение; пропускную способность;

системы оплаты – внедрение транспондеров, мобильных приложений, терминалов с NFC; сроки ввода в эксплуатацию. Пункты взимания платы следует проектировать в увязке с проектными решениями всей платной автомобильной дороги.

Ключевыми показателями качества услуг по взиманию платы за проезд являются: гарантированное время в пути, доступность и удобство сервисов оплаты, упрощённая процедура получения транспондеров, а также пропускная способность пунктов взимания платы. Пропускная способность ПВП должна соответствовать расчетной интенсивности движения платной автомобильной дороги.

3.1 Оптимизация размещения пунктов взимания платы

Ключевые параметры инфраструктуры платных дорог, включая количество и расположение пунктов взимания платы, а также применяемые системы оплаты, определяются в ходе инвестиционного анализа при проектировании таких автомагистралей. Особое значение при этом приобретает учет транспортно-экономических связей между территориями.

Неоптимальное расположение ПВП может приводить к существенному снижению показателей надежности скоростного режима. Формирование зон вынужденного торможения, неравномерность разгонных характеристик транспортных средств, возникновение задержек и заторов – все эти факторы способствуют увеличению дисперсии скоростей и снижению средней скорости движения [8].

Надежность скоростного режима подвергается дополнительному снижению вследствие эффекта накопления, при котором несколько последовательно расположенных ПВП создают кумулятивное воздействие, взаимно усиливая негативное влияние каждого из пунктов. Возникающее нарушение организации движения приводит к снижению скорости движения, распространяющемуся вдоль транспортного коридора между пунктами взимания платы.

Надежность скоростного режима на подходах к городским агломерациям достигается через оптимизацию пространственного распределения ПВП. Рациональное расположение пунктов взимания платы обеспечивает сохранение однородности транспортного потока и минимальную дисперсию скоростей, что способствует росту транспортной подвижности [9].

Для определения рационального расположения пунктов взимания платы целесообразно использовать теорию пространственной локализации, разработанную Альфредом Вебером. Данный подход представляет собой совокупность методов линейного программирования, направленную на поиск экстремума целевой функции при заданной системе линейных ограничений.

Теорию Вебера, изначально разработанную для промышленного размещения, можно адаптировать к транспортной системе, где ключевыми факторами становятся транспортные издержки (зависимость от расстояния и грузопотоков) и агломерационные эффекты (влияние крупных городов и промышленных центров).

Агломерационные эффекты в контексте проектирования платных дорог представляют собой системную формализацию влияния городских образований на оптимальность расположения пунктов взимания платы. В отличие от промышленной трактовки Вебера, где агломерация сводится к экономии на масштабе производства, в транспортной модели эти эффекты приобретают многомерный характер, отражая способность городов генерировать, притягивать и трансформировать транспортные потоки.

В отличие от модели А. Вебера, где целевой функцией является минимизация транспортных издержек доставки грузов, в настоящем исследовании целевая функция формулируется как минимизация дисперсии скоростей на километре дороги. С этой точки зрения кумулятивный эффект выражается в последовательном нарастании дисперсии скорости от одного ПВП к другому: каждое последующее торможение происходит на фоне ещё не полностью стабилизировавшегося потока после предыдущего пункта [22].

Возникающее нарушение организации движения приводит к снижению скорости, распространяющемуся вдоль транспортного коридора между ПВП, причём рост дисперсии носит нелинейный характер, увеличиваясь с каждым дополнительным пунктом.

Такой подход позволяет обосновать размещение ПВП не в точке минимума транспортных затрат (по Веберу), а в зоне устойчивого равновесия, где потери от циклов «торможение – разгон» компенсируются агломерационными эффектами – стабилизирующим влиянием плотного потока, генерируемого крупными городами. Учёт дисперсии скоростей транспортного потока как самостоятельного критерия оптимизации даёт возможность оценивать кумулятивное воздействие нескольких ПВП не через прирост издержек, а через вероятность снижения скорости ниже концессионного уровня, что непосредственно влияет на доходность платного проекта.

Ниже представлена схема (Рисунок 3.1), которая визуализирует последовательный процесс такой формализации. Она отражает путь от сбора исходных данных о городе до интеграции рассчитанных показателей в оптимизационную модель, обеспечивая системный и воспроизводимый подход к учету агломерационных эффектов при проектировании платных автомагистралей.

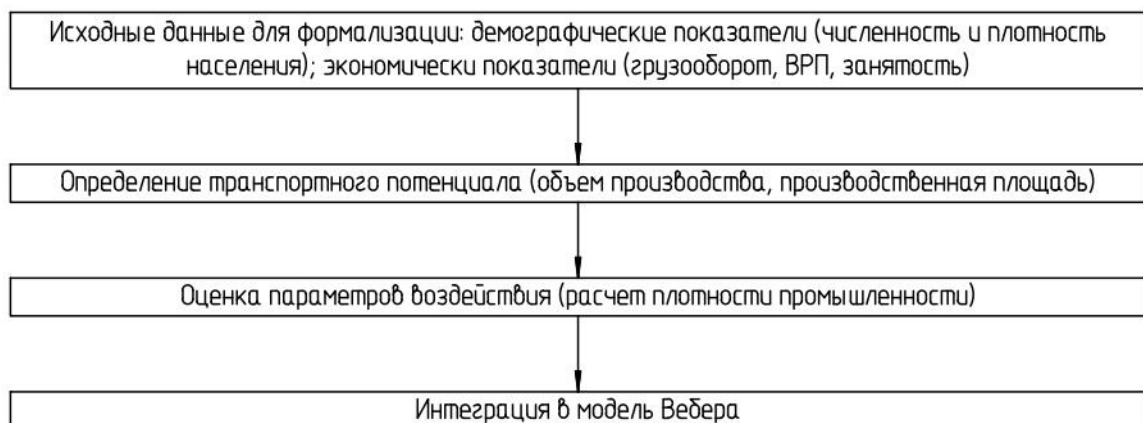


Рисунок 3.1 – Схема формализации агломерационных эффектов

Применение модели Вебера (теории оптимального размещения производства) к проектированию платных дорог является инновационным по следующим причинам:

– фокус на двух ключевых факторах: «Вес» (экономико-производственный потенциал городов); «Расстояние» (приведённая дистанция с учётом скорости, безопасности и комфорта);

– оптимизация системы обслуживания: может быть достигнута за счет размещения пунктов взимания платы, которое минимизирует возможность образование заторов. Такой подход позволяет обеспечить стабильность скоростных характеристик транспортного потока за счет сокращения вынужденных маневров и неоправданных изменений скорости движения. Оптимальное расположение ПВП способствует поддержанию равномерного скоростного режима и снижению дисперсии скоростей, что является одним из основных факторов повышения надежности транспортной системы в целом.

В модели Вебера «транспортные затраты» трансформируются в:

- прямые затраты пользователей (стоимость проезда);
- неявные издержки (время в пути, безопасность).

Актуальность исследования определяется необходимостью повышения надежности скоростного режима на платных автомобильных дорогах через оптимизацию размещения пунктов взимания платы. Решение данной задачи позволит не только снизить транспортные затраты пользователей, но и обеспечить стабильность движения за счет снижения дисперсии скоростей.

В рамках данной модели целевая функция выражает совокупные экономические издержки, включающие транспортные расходы и эффекты пространственной концентрации экономической активности. Оптимизационная задача сводится к нахождению такой точки размещения, где сумма расстояний до ключевых транспортных узлов (с учетом весовых коэффициентов) достигает минимального значения. Такой подход позволяет

научно обосновать выбор местоположения пунктов взимания платы, учитывая как экономические, так и транспортно-логистические факторы [13].

В рамках теории пространственной локализации А. Вебера особое значение приобретает анализ детерминант, влияющих на выбор местоположения ПВП. Среди ключевых факторов размещения следует выделить:

- эффективность как интегральный показатель, определяющий оптимизацию транспортных издержек, сокращение временных затрат на перевозки и повышение пропускной способности дорожной сети;

- временной фактор, проявляющийся в уменьшении продолжительности транспортных операций, возможности ускоренной доставки грузов и пассажиров, повышении оборачиваемости транспортных средств;

- транспортную составляющую, включающую удобство интеграции в существующую дорожную инфраструктуру, обеспечение равномерной нагрузки на транспортную сеть, минимизацию отклонений от основных грузопотоков.

Повышение надежности скоростного режима при оптимальном размещении ПВП обеспечивает значительный экономический эффект за счет стабилизации транспортного потока. Снижение дисперсии скоростей движения позволяет минимизировать эксплуатационные затраты участников дорожного движения благодаря сокращению временных потерь и оптимизации использования подвижного состава. Достижение однородности скоростных характеристик потока способствует уменьшению циклов «разгон – торможение», что непосредственно влияет на экономию топлива и снижение износа транспортных средств.

Реализация такого подхода создает синергетический эффект, при котором рациональное пространственное размещение объектов дорожной инфраструктуры обеспечивает повышение надежности скоростного режима за счет снижения дисперсии скоростей и увеличения однородности

транспортного потока, что в конечном счете способствует росту экономической эффективности всей транспортной системы.

При исследовании производственных издержек, варьирующихся в зависимости от локализации ПВП, целесообразно сосредоточиться на трех основных компонентах: транспортная составляющая (уровень развития дорожной сети, интенсивность грузопотоков, доступность альтернативных маршрутов), система обслуживания (стоимость проезда по платным участкам и дифференциация по категориям транспортных средств), агломерационный эффект (плотность промышленных предприятий, концентрация логистических центров).

Данная классификация позволяет дифференцированно подходить к планированию инфраструктуры. Для региональных факторов (транспорт и система обслуживания) требуются макроэкономические решения, локальные особенности (агломерации) нуждаются в точечном учете при проектировании.

Среди ключевых факторов размещения ПВП приоритетное значение имеет транспортная составляющая, включающая массу перевозимых грузов, расстояние транспортировки. В предлагаемой адаптации теории локализации А. Вебера ключевым критерием целевой функции становится минимизация дисперсии скоростей транспортного потока на километре дороги. Соответственно, транспортная составляющая дополняется дисперсией скоростей транспортного потока – показателем, отражающим степень неоднородности движения, которая непосредственно влияет на надёжность скоростного режима и, как следствие, на коммерческую эффективность платного проекта. Оптимальное расположение ПВП определяется не как точка минимума издержек, а как зона устойчивого равновесия, в которой потери от зон принудительного торможения и разгона компенсируются агломерационными эффектами, обеспечивая сбалансированную нагрузку на дорожную сеть и минимальный рост дисперсии скоростей.

На следующем этапе анализа рассматриваются дополнительные факторы (система обслуживания на платных участках и эффект агломерации в прилегающих территориях). Отличие в издержках на стоимость проезда по платной автомагистрали представляется как отношение к транспортным издержкам и будет являться первой отклоняющей силой.

В системе факторов размещения ПВП особое значение приобретает агломерационный эффект, проявляющийся в транспортно-ориентированном тяготении (концентрация грузопотоков вокруг промышленных кластеров, формирование устойчивых транспортных коридоров). Агломерационный фактор является второй отклоняющей силой и направлен на изменение основной сети платных дорог и размещение ПВП к местам территориального тяготения.

Три ключевых фактора – масса перевозимого груза, протяженность маршрута и уровень агломерации – образуют систему взаимосвязанных компонентов, которую можно представить графически (Рисунок 3.2).

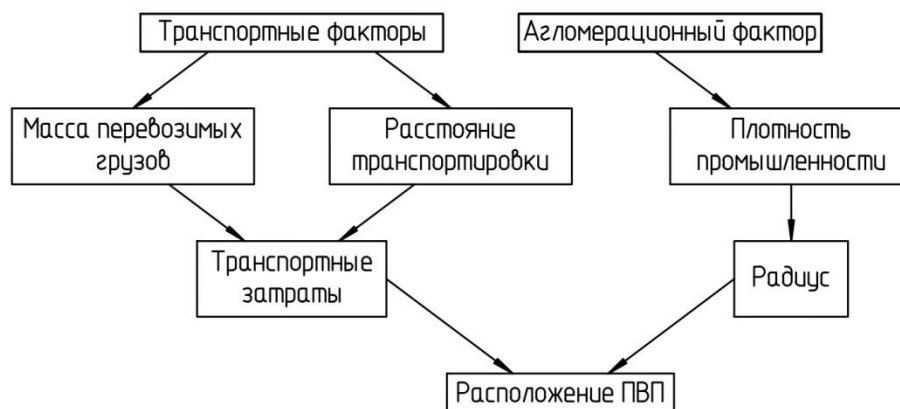


Рисунок 3.2 – Схема взаимодействия основных факторов

Систематический учет эти трех факторов позволит найти оптимальное расположение пункта взимания платы с позиции минимизации дисперсии скоростей транспортного потока. Сформулируем целевую функцию, минимизирующую дисперсию скоростей с учетом агломерационных эффектов. Потери, обусловленные ростом неоднородности потока, которые складываются из двух компонентов:

$$- \text{транспортные затраты: } \Delta T = A \cdot r \cdot M \cdot C_h, \quad (3.1)$$

$$- \text{экономия от агломерации: } \Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_{M+t} - \mathcal{E}_M, \quad (3.2)$$

где A – штандортный вес;

r – расстояние от города до пункта взимания платы;

M – производственная масса;

C_h – стоимость использования автомобиля;

\mathcal{E}_{M+t} – сумма экономий для крупного города производственной массой (M) и близлежащего города с производственной массой (t), составляет:

$$\mathcal{E}_{M+t} = (M + t) \cdot \varphi(M + t), \quad (3.3)$$

\mathcal{E}_M – общая величина экономии для всего объёма производства, определяется:

$$\mathcal{E}_M = M \cdot \varphi(M), \quad (3.4)$$

где $\varphi(M)$ – функция сбережений.

При расположении ПВП минимизируем разность между транспортными затратами и агломерационной экономией:

$$\min_r \left(A \cdot r \cdot M \cdot C_h - ((M + t) \cdot \varphi(M + t) - M \cdot \varphi(M)) \right). \quad (3.5)$$

Оптимальное расстояние от города до пункта взимания платы (r) будет достигаться тогда, когда экономия от агломерации ($\Delta \mathcal{E}$) будет больше транспортных затрат (ΔT):

$$\Delta \mathcal{E} > \Delta T \quad (3.6)$$

или

$$(M + t) \cdot \varphi(M + t) - M \cdot \varphi(M) > A \cdot r \cdot M \cdot C_h. \quad (3.7)$$

Из этого следует, что наибольшее расстояние, на которое будет действовать притягивающая сила, составит $R (R = \max r)$, где R – радиус наибольшего, экономически допустимого отклонения:

$$(M + t) \cdot \varphi(M + t) - M \cdot \varphi(M) = A \cdot r \cdot M \cdot C_h. \quad (3.8)$$

При $t \rightarrow 0$ левую часть полученного выражения (формула (3.8)) можно представить в виде первой производной функции φ :

$$\varphi'(M) = \frac{d(M \cdot \varphi(M))}{dM} = A \cdot R \cdot C_h. \quad (3.9)$$

Представим правую часть равенства через $f(M)$:

$$\varphi'(M) = \frac{d(M \cdot \varphi(M))}{dM} = f(M). \quad (3.10)$$

Полученная функция будет являться функцией агломерации, которая служит выражением притягательной силы пункта взимания платы по отношению к городам. Из представленных условий (формулы (3.9) и (3.10)) получаются следующие равенства:

$$f(M) = A \cdot R \cdot C_h, \quad (3.11)$$

$$R = \frac{f(M)}{A \cdot C_h}. \quad (3.12)$$

Для получения представлений о фактическом расширении радиуса агломерации и определении реального объема агломерации необходимо учесть фактор агломерации – «плотность промышленности». Плотность промышленности (ρ) определяет длину радиуса (R). Формула выглядит следующим образом [32]:

$$\rho = \frac{M}{\pi \cdot R^2}. \quad (3.13)$$

При этом оптимальное расположение должно удовлетворять ограничению:

$$R \leq \sqrt{\frac{M}{\pi \cdot \rho}}. \quad (3.14)$$

Все параметры имеют физический смысл только при неотрицательных значениях. Итоговая математическая модель будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_r \left(A \cdot r \cdot M \cdot C_h - ((M + t) \cdot \varphi(M + t) - M \cdot \varphi(M)) \right) \\ (M + t) \cdot \varphi(M + t) - M \cdot \varphi(M) > A \cdot r \cdot M \cdot C_h \\ R \leq \sqrt{\frac{M}{\pi \cdot \rho}} \\ A, r, M, C_h \geq 0; \rho > 0; t \geq 0. \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Для обоснования рационального размещения ПВП с учётом внешних факторов в рамках предлагаемого подхода строится изодапан, отражающий рост дисперсии скоростей по мере удаления от зоны устойчивого равновесия,

где агломерационные эффекты компенсируют возмущения, вносимые ПВП. Чем дальше расположен ПВП от центра агломерации, тем выше дисперсия скоростей на прилегающих участках и, соответственно, тем больше потенциальные потери концессионера от снижения надёжности скоростного режима. Таким образом, изодапан позволяет визуализировать границы, внутри которых размещение ПВП обеспечивает минимальный прирост дисперсии (Рисунок 3.3).

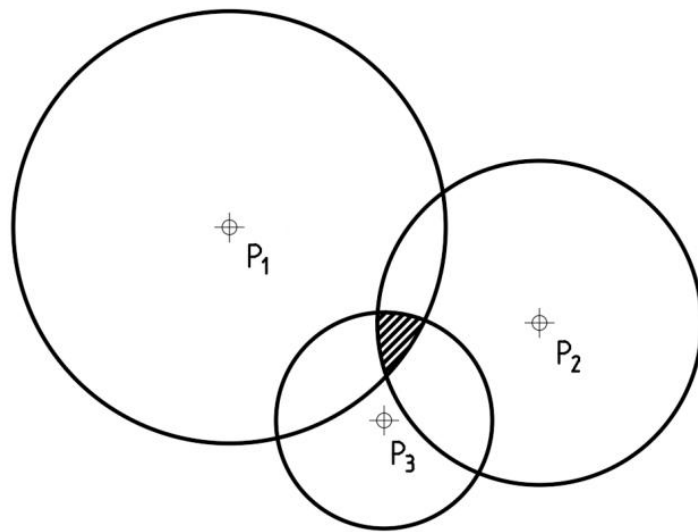


Рисунок 3.3 – Размещение пункта взимания платы с использованием изодапанов:
 $P(P_1, P_2, P_3)$ – город [87]

Применение теории Вебера направлено на оптимизацию расположения пунктов взимания платы с позиции обеспечения надёжности скоростного режима. Методология предполагает размещение ПВП на оптимальном расстоянии от крупных городов, основанное на принципе равенства потерь от неоднородности потока для различных направлений из мегаполиса. Такой подход позволяет не только повысить эффективность системы взимания платы, но и способствует стабилизации скоростных характеристик транспортного потока. Сам алгоритм расчета можно представить в виде блок-схемы (Рисунок 3.4).

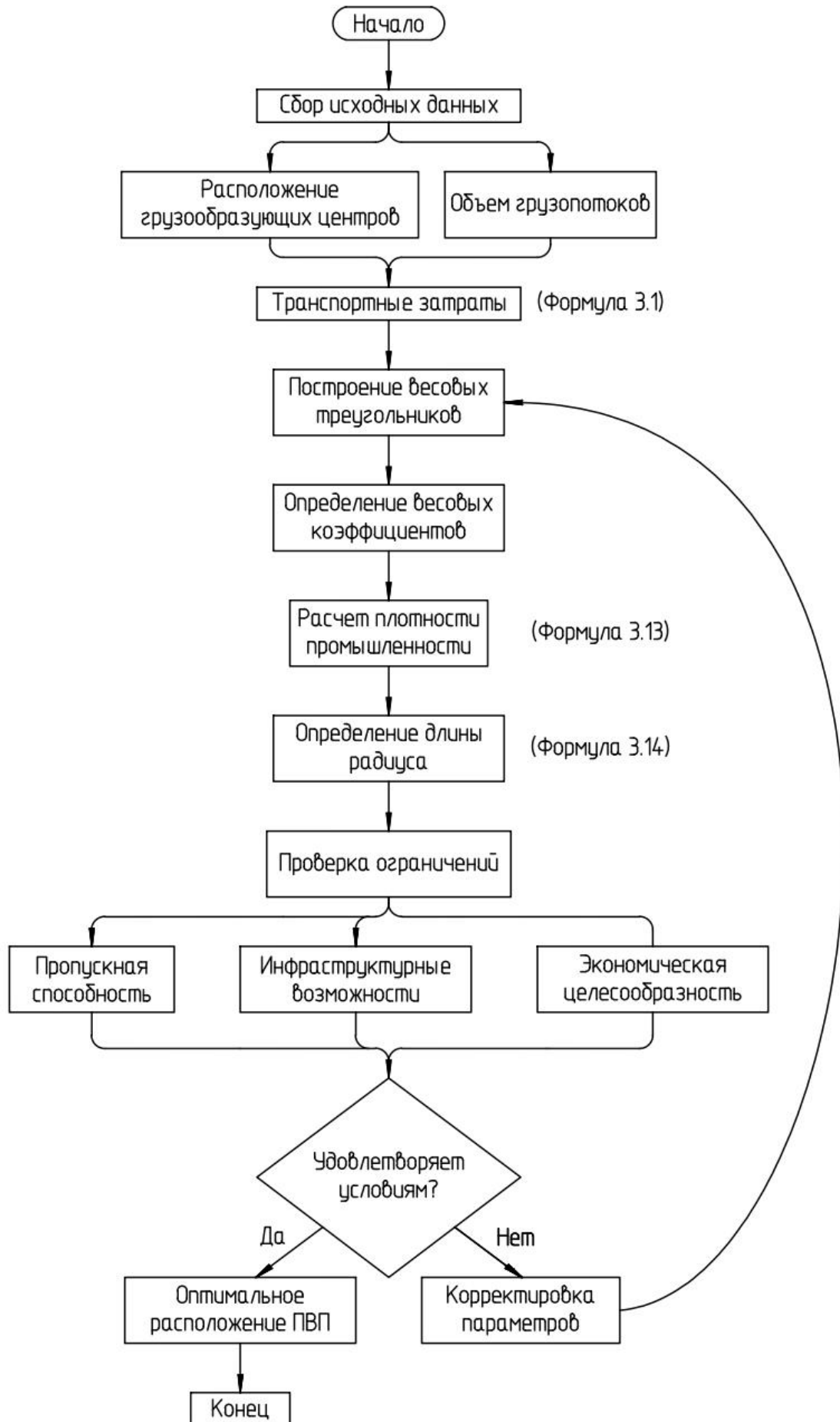


Рисунок 3.4 – Алгоритм расчета оптимального расположения пункта взимания платы

Обеспечения стабильного скоростного режима возможно при условии, что пункт взимания платы для соседних населённых пунктов расположен в пределах зоны экономической целесообразности. Такой зоной является область пересечения критических изодапанов – границ, за пределами которых размещение ПВП становится нерентабельным. Оптимальное местоположение определяется общей площадью, формируемой наложением этих изодапанов.

3.2 Практическое применение метода размещения пунктов взимания платы

Рассмотрим практическое применение данной теории на примере участка Дюртюли – Ачит автомагистрали М-12 «Восток» по принципу минимизации суммарных расстояний от объектов размещения ПВП до всех остальных точек. Для нахождения оптимального расположения ПВП были построены изодапаны, центрами которых выступили близлежащие населенные пункты, где будет проходить платная трасса.

Определение оптимального радиуса обслуживания пунктов взимания платы производилось на основании комплексного анализа промышленного потенциала населенных пунктов (Таблицы 3.1–3.5) [57; 64].

Красноуфимск функционирует как значительный промышленно-транспортный центр в рамках Предуралья, выполняя функции межрайонного центра. Город представляет собой сложный многопрофильный комплекс. Его отличительными чертами являются сочетание обрабатывающих производств (пищевого, машиностроительного, швейного) с предприятиями лесного сектора. Данный экономический профиль сформировал за Красноуфимском статус не просто промышленного, но и важного распределительного и трудового центра для Предуралья [46].

Таблица 3.1 – Производственные предприятия в г. Красноуфимске

№ п/п	Наименование предприятия	Объем производства (чистая прибыль), млн руб.	Производственная площадь, тыс. м ²
1	ООО «Маяк-Агро»	22,90	7,78
2	ООО «Приданниковское»	3,35	1,97
3	ООО «АВИС «КОМЕТА»	23,90	71,06
4	ООО «Техник»	53,70	73,04
5	ООО «Галс»	16,30	19,20
6	ООО «Строительная компания»	4,87	10,61
7	ООО «Монтажкомплектсервис»	3,24	6,11
8	ЗАО «Красноуфимский молочный завод»	16,00	40,79

Промышленность рабочего посёлка Октябрьского сформировалась вокруг переработки сельскохозяйственной продукции и обслуживания транспортной инфраструктуры. Сферы деятельности, представленные в Октябрьском: пищевая промышленность, строительство и сырьё, транспорт и логистика [50].

Таблица 3.2 – Производственные предприятия в рп. Октябрьском

№ п/п	Наименование предприятия	Объем производства (чистая прибыль), млн руб.	Производственная площадь, тыс. м ²
1	ООО «СтройТехСервис»	77,70	38,26
2	ООО «АгроПромХимия»	10,50	26,85
3	ООО Маслозавод «Октябрьский»	2,15	45,28
4	ООО «Газстройдеталь»	6,54	20,16
5	ООО «Урал ойл»	1,77	27,49
6	ООО «Карьер Истяк»	68,80	225,32

Развитие города Чернушки в Пермском крае связано с нефтедобывающей промышленностью. Помимо нефтедобычи, промышленный профиль Чернушки характеризуется развитием смежных и вспомогательных отраслей. Город определяется как промышленный центр юга Пермского края, где действуют предприятия строительной и перерабатывающей отраслей. Диверсификация промышленности, представленная строительным комплексом и перерабатывающими производствами, носит вторичный, дополняющий характер и тесно связана с базовой нефтяной отраслью. Данная экономическая модель позволяет

охарактеризовать Чернушку как устойчивый монопрофильный центр с долгосрочной сырьевой специализацией [51].

Таблица 3.3 – Производственные предприятия в г. Чернушке

№ п/п	Наименование предприятия	Объем производства (чистая прибыль), млн руб.	Производственная площадь, тыс. м ²
1	ООО «ЛУКойл-Пермь»	334,20	476,43
2	ООО «Теплосервис»	68,90	38,07
3	ООО «Чернушкастройкерамика»	16,60	113,87
4	ООО «МаСКо»	23,00	110,77
5	ООО «Чернушинское УТТ»	19,30	186,38

Отраслевая структура промышленности Бирска отличается диверсифицированностью, однако ведущая роль принадлежит обрабатывающим производствам, в особенности пищевой промышленности. Ключевые промышленные предприятия и направления деятельности: пищевая промышленность, лёгкая промышленность, деревообработка [45].

Таблица 3.4 – Производственные предприятия в г. Бирске

№ п/п	Наименование предприятия	Объем производства (чистая прибыль), млн руб.	Производственная площадь, тыс. м ²
1	АО «Башспирт»	164,30	10,25
2	ООО «Бирская керамика»	12,00	2,92
3	ООО «Спектр»	5,20	26,37
4	ООО «Бирский комбинат молочных продуктов»	32,03	34,39
5	ООО «Электрические сети»	57,80	19,54

Город Дюртюли является важным промышленным центром северо-западного региона Башкортостана. Современный промышленный комплекс города представлен несколькими ключевыми отраслями: пищевая промышленность, промышленность строительных материалов [48].

Таблица 3.5 – Производственные предприятия в г. Дюртюли

№ п/п	Наименование предприятия	Объем производства (чистая прибыль), млн руб.	Производственная площадь, тыс. м ²
1	АО «Дюртюлинские Э и ТС»	27,01	10,14
2	ООО «Завод ЖБИ 4»	15,63	2,66
3	ООО «БетонСервис»	69,40	47,47
4	АО «Дюртюлинский комбинат молочных продуктов»	6,24	53,77

В ходе исследования было получено, что следует установить три ПВП: пункт № 1 – между рп. Октябрьским и г. Красноуфимском; пункт № 2 – в районе п. Щучье Озеро для передвижений жителей г. Чернушки и рп. Октябрьского; для доступа к платной трассе жителей г. Дюртюли и г. Бирска между ними необходимо организовать ПВП № 3 (Рисунок 3.5).

Зона оптимального расположения ПВП расположена в заштрихованной области.

Для анализа оптимальности расположения трех ПВП применим транспортную задачу линейного программирования [3]. В исследовании учитываются пять промышленных населенных пунктов (г. Красноуфимск, рп. Октябрьский, г. Чернушка, г. Бирск, г. Дюртюли), годовые объемы производства (грузообразующий потенциал), матрица расстояний между городами и ПВП.

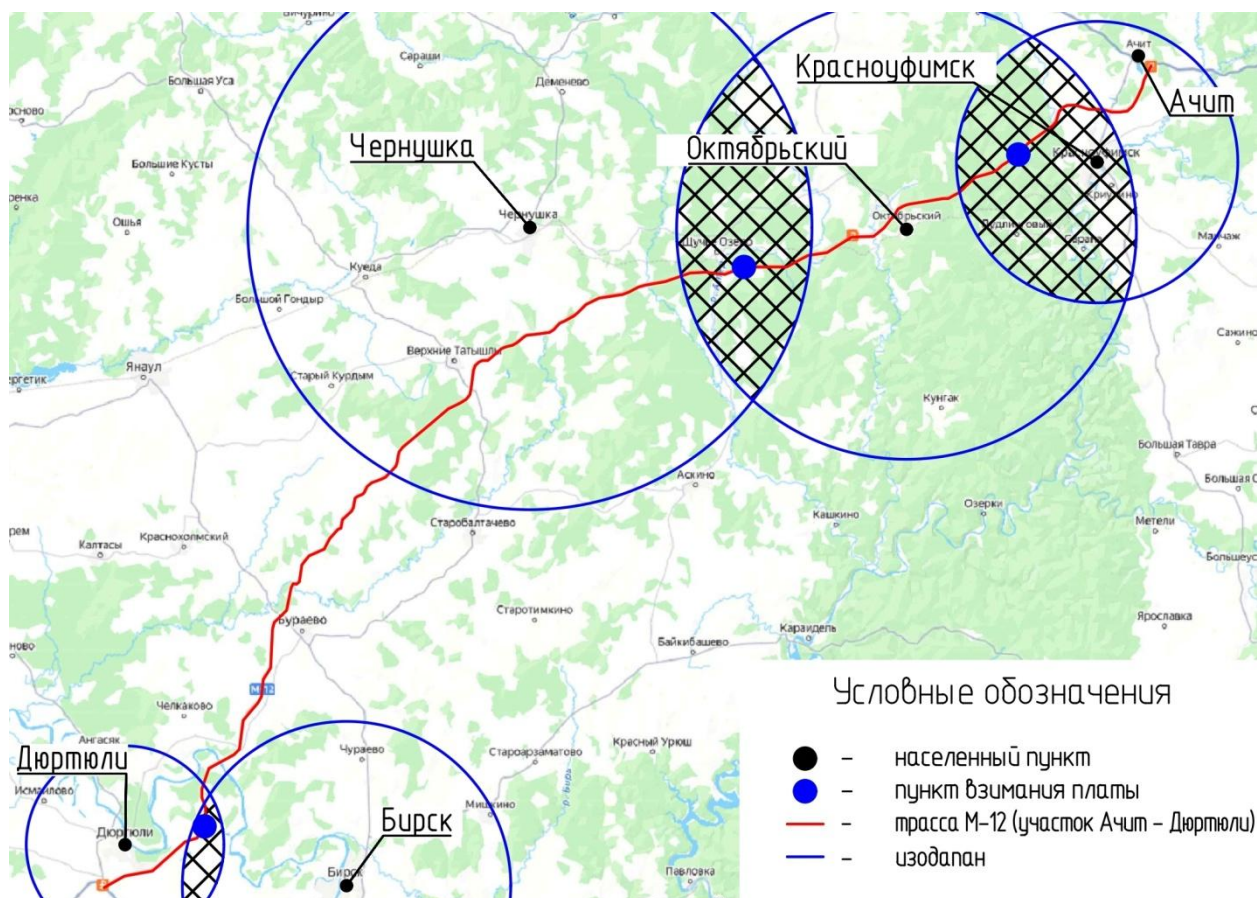


Рисунок 3.5 – Размещение ПВП на трассе М-12 «Восток» (участок Ачит – Дюртюли)

Переменными решения в данной транспортной задаче являются объемы перевозок (грузопотоки) от каждого ПВП к каждому населенному пункту.

Требуется составить такой план перевозок, при котором общая стоимость всех перевозок была бы минимальной:

$$z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (3.16)$$

где c_{ij} — стоимость доставки груза от начальной точки с индексом i до конечной точки с индексом j ;

x_{ij} — объем перевозки груза от начальной точки с индексом i до конечной точки с индексом j .

Ячейки, в которых указан ненулевой объем перевозки ($x_{ij} \neq 0$), носят название «отмеченные», а ячейки с нулевым объемом перевозки ($x_{ij} = 0$) называются «не отмеченные». Для занятых ячеек рассчитываются значения потенциалов (v_j, u_i):

$$c_{ij} = v_j - u_i. \quad (3.17)$$

Решение транспортной задачи происходит в два этапа:

Этап 1. Построение начального плана методом минимального элемента. На данном этапе формируется исходное распределение грузов x_{ij} по следующему алгоритму: выбирается маршрут с минимальным расстоянием между населенным пунктом-отправителем и ПВП; на выбранный маршрут назначается максимально возможный объем перевозок; из оставшихся доступных маршрутов повторно выбирается вариант с наименьшей дистанцией, и процедура распределения объема повторяется. Цикл продолжается до тех пор, пока весь груз не будет распределен.

Этап 2. Оптимизация плана перевозок.

Для достижения оптимального решения, соответствующего критерию (формула (3.16)), был использован метод потенциалов. Система линейных уравнений используется в случае формирования системы уравнений для базисных (занятых) ячеек. Поскольку количество уравнений на единицу

меньше числа неизвестных потенциалов, система имеет бесконечное множество решений. Зафиксировав значение одного из потенциалов, находят частное решение системы, позволяющее вычислить остальные потенциалы. После расчета потенциалов выполняется проверка выполнения критерия оптимальности для всех свободных ячеек:

$$c_{ij} \geq v_j - u_i. \quad (3.18)$$

Если проверяемое условие выполняется для всех ячеек транспортной таблицы, полученный план перевозок считается оптимальным и обеспечивает минимальные совокупные затраты на доставку грузов. Если условие не выполняется, осуществляется переход к улучшенному плану.

Условие транспортной задачи удобно записать в виде таблицы (Таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Вид данных транспортной задачи линейного программирования

ПВП	Населенный пункт					Проход через ПВП	V
	Красноуфимск	Октябрьск	Чернушка	Бирск	Дюртюли		
2	145 15	84 26	26 95	34 191	20 217	229	14
3	21 71	84 32	462 42	40 141	26 163	546	20
4	11 214	22 177	32 131	272 30	119 16	391	10
Объем производства	145	168	462	272	119		
<i>U</i>	1	12	22	20	6		

Проведенные расчеты методом линейного программирования демонстрируют, что результаты решения транспортной задачи, направленной на минимизацию логистических издержек, согласуются с ключевыми принципами теории Вебера. Это подтверждает возможность и эффективность применения данной теории для обоснования размещения пунктов взимания платы.

Поскольку оптимальное размещение само по себе не решает проблему торможения, необходимо рассмотреть технологии, которые позволят

реализовать этот оптимальный план на практике без потерь, вызванных задержками на пунктах взимания платы, а именно технологию автоматизированного взимания платы «Свободный поток». Её внедрение обеспечит стабильный скоростной режим за счет:

- полного исключения принудительного торможения и остановок, которые являются главным источником неравномерности движения. Это обеспечивает поддержание расчетной скорости на подходах к ПВП и за ними;

- создания условий для безопасного и стабильного движения за счет отсутствия точек конфликта и резких маневров в зоне взимания платы. Это позволяет водителям дольше поддерживать постоянную разрешенную скорость, что повышает общую регулярность и пропускную способность.

3.3 Устройство безбарьерной системы оплаты

Процесс функционирования ПВП можно проанализировать, представив в виде последовательности специализированных зон, которые преодолевает транспортное средство от въезда до слияния в основной поток автомобильной дороги. Выделяется четыре ключевых участка: зона въезда, ожидания, выезда и слияния (Рисунок 3.6) [36].

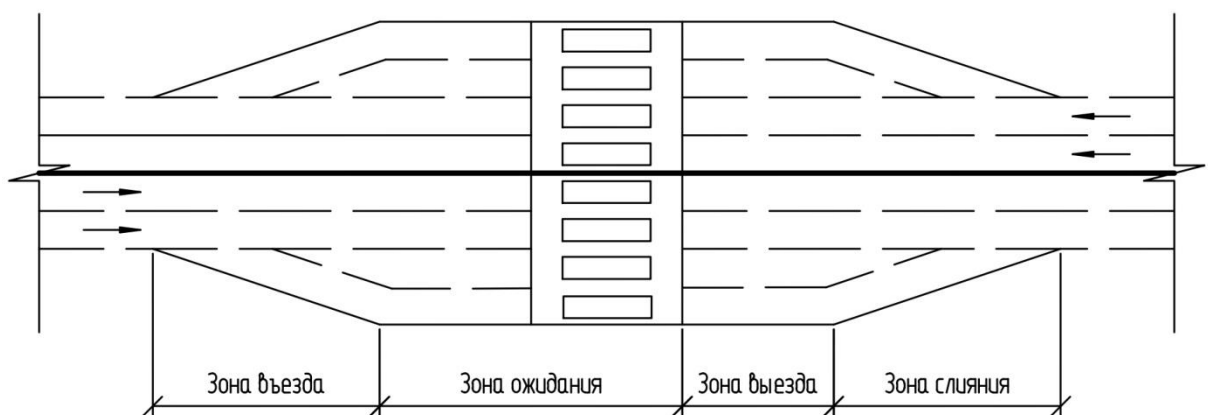


Рисунок 3.6 – Схема пункта взимания платы [36]

На участке въезда автомобиль перестраивается для подъезда к конкретному окну. Зона ожидания предназначена для очереди перед оплатой,

а на участке выезда происходит изменение скорости движения. Финальная стадия – зона слияния, где транспортное средство вливается в общий трафик. При этом зоны въезда и слияния характеризуются изменением количества полос относительно основной дороги и могут иметь различную конфигурацию.

При приближении к пункту взимания платы автоматизированная система распознаёт категорию транспортного средства и отображает на экране стоимость проезда в соответствии с установленным тарифом. Оплата доступна в наличной форме или посредством безналичного расчёта. Полученный у оператора чек необходимо хранить до завершения поездки – он служит подтверждением оплаты и может быть запрошен при выезде с платного участка.

Для пользователей, оборудованных транспондером (например, устройством T-Pass), процесс оплаты полностью автоматизирован: при проезде ПВП система бесконтактно считывает данные прибора, списывает средства с его баланса и активирует подъём шлагбаума, обеспечивая непрерывное движение.

К критериям качества оказания услуг по взиманию платы за проезд относят: гарантированное время в пути, удобство получения транспондера, пополнения счета, контроля расходов, а также пропускную способность пунктов взимания платы и эксплуатационную эффективность. Эксплуатационная эффективность должна обеспечивать максимальный пропуск транспортных средств при наличии минимального количества персонала и оборудования. Пропускная способность ПВП должна соответствовать расчетной интенсивности движения платной автомобильной дороги [16].

Расчет пропускной способности пункта взимания платы осуществляется на основе часовой интенсивности движения транспортных средств, количестве затраченного времени на обслуживание одного клиента

при утвержденной технологии взимания платы за проезд по платному участку и максимальному количеству времени, отведенному на ожидание.

Интенсивность движения по платной автомагистрали М-12 «Восток» (участок Дюртюли – Ачит, км 90 – км 140) составляет 9360 авт./сут (см. Раздел 2.2, Таблицу 2.8). Проанализировав динамику движения в течение суток (см. Раздел 2.2, Рисунок 2.9) максимальное количество автомобилей, проезжающих в течение часа, составляет 722 авт./ч.

Для расчета пропускной способности шлюза пункта взимания платы (ПВП) применяется формула [33]:

$$P_{\text{ш}} = \frac{3600}{\sum_{k=1}^n \sum_{c=1}^m D \cdot t_3}, \quad (3.19)$$

где $P_{\text{ш}}$ – пропускная способность исследуемого шлюза, авт./ч; k – количество категорий автомобилей, проезжающих через шлюз; c – количество способов оплаты проезда; D – доля автомобилей, использующих определённый метод оплаты, в общем транспортном потоке; t_3 – время, затрачиваемое на транзакцию при заданном типе оплаты, с.

Для оценки пропускной способности всего пункта взимания платы используем формулу:

$$P_{\text{пвп}} = \sum_{i=1}^k P_{\text{ш}}, \quad (3.20)$$

где $P_{\text{пвп}}$ – общая пропускная способность пункта взимания платы, авт./ч; $P_{\text{ш}}$ – количество транспортных средств, которое способен пропустить шлюз, авт./ч.

Водителей, которые применяют транспондеры для автоматической оплаты проезда, – 60 %. Оставшиеся 40 % пользователей выбирают оплату наличным и безналичным расчетом с участием кассира-оператора [5].

Определим пропускную способность шлюза ПВП с использованием транспондера:

$$P_{\text{ш}} = \frac{3600}{4 \cdot 2 \cdot 0,6 \cdot 3} = 250 \text{ авт./ч.}$$

Определим пропускную способность шлюза ПВП с помощью кассира:

$$P_{ш} = \frac{3600}{4 \cdot 2 \cdot 0,4 \cdot 15} = 70 \text{ авт./ч.}$$

Для расчета оптимального числа шлюзов в зоне взимания платы учитывается пиковая часовая нагрузка на участке платной магистрали, составляющая 722 авт./ч. Поток транспорта распределяется следующим образом, в одном направлении движение достигает 361 авт./ч. Из них 217 транспортных средств оснащены транспондерами. Для их обслуживания требуется два шлюза (по одному в каждом направлении). Оставшиеся 144 автомобиля, где водители оплачивают проезд через кассира, обслуживаются тремя шлюзами в одном направлении, каждый из которых обладает пропускной способностью 70 авт./ч [16].

Пропускная способность всего пункта взимания платы определяется:

$$P_{ПВП} = 2 \cdot 250 + 6 \cdot 70 = 920 \text{ авт./ч.}$$

Для оценки снижения эффективности движения на пунктах оплаты с участием кассира определим потери скорости транспортного потока и вызванные ими временные задержки. Анализ проводится для трех возможных вариантов:

1. Снижение пропускной способности ПВП, увеличение количества автомобилей и образование заторов (пропускная способность $z > 1,0$).
2. Пропускная способность находится в пределах нормируемых значений, но при проезде через ПВП возникает скопление транспортных средств ($1 > z > 0,8$).
3. Снижение пропускной способности не наблюдается, скопление транспортных средств отсутствует ($z < 0,8$).

Определим транспортные издержки для вышеуказанных ситуаций.

1. Пропускная способность $z > 1,0$ (в расчете принято $z = 1,2$).

Если принять максимальную пропускную способность пункта взимания платы 920 авт./ч, то количество желающих проехать через пункт взимания платы увеличиться на 184 авт./ч. Чтобы пропустить 184 авт./ч, потребуется дополнительно 12 мин, т. е. 920 автомобилей проезжают в течение часа, а для пропуска 184 транспортных средств потребуется

дополнительное время. Из этого следует, что для пропуска 1104 автомобилей потребуется 72 мин. Можно сделать вывод, что при коэффициенте загрузки $z = 1,2$ одно транспортное средство на ПВП в среднем потратит на 12 мин больше. Тогда потери времени при образовании затора составят 221 авт./ч.

2. Пропускная способность $1 > z > 0,8$ (в расчете принято $z = 0,9$).

Найдем транспортные потери для автомобилей, которые будут оплачивать проезд за наличный или безналичный расчет. В данном случае затора не ожидается, и потери времени у водителей будут связаны лишь с остановкой для оплаты за проезд с участием кассира-оператора. Данный ПВП способен пропускать 920 авт./ч. В среднем один автомобиль на торможение и ускорение тратит 34,7 с [52]. Тогда потери на остановку составят 8 авт./ч.

Пропускная способность $z < 0,8$ (в расчете принято $z = 0,5$). В данном варианте также будут учитываться временные потери автомобилей, водители которых оплачивают проезд у кассира-оператора, соответственно автомобили будут совершать вынужденную остановку. Потери на торможение и ускорение составят 5 авт./ч.

На основании проведённых расчётов ежесуточные потери времени оцениваются в 78 авт./ч.

Для повышения средней скорости транспортного потока и сокращения количества точек его принудительного торможения предлагается внедрение технологии «Свободный поток». Данная бесконтактная система исключает необходимость установки шлагбаумов, позволяя транспорту преодолевать пункты оплаты без снижения скорости [13]. Идентификация транспортных средств осуществляется посредством автоматического распознавания государственных номеров (Рисунок 3.7).

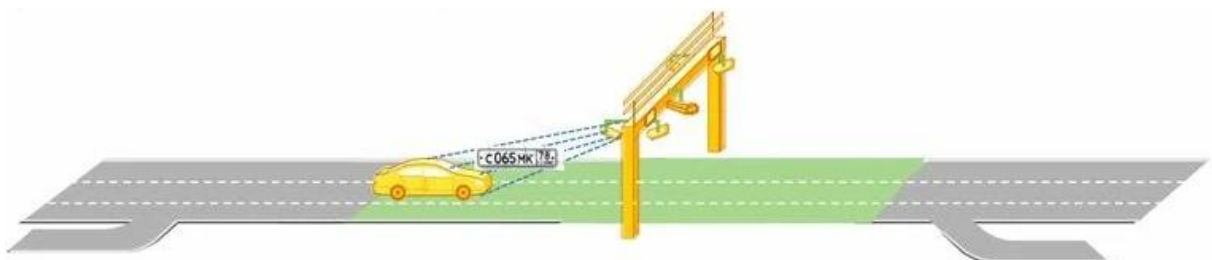


Рисунок 3.7 – Принцип работы системы «Свободный поток» [65]

Технология «Свободный поток» позволяет полностью отказаться от стандартных пунктов взимания платы с физическими шлагбаумами, что делает дорожную инфраструктуру свободной от барьеров [17]. Сравнительный анализ классической барьерной системы и технологии «свободный поток» представлен в Таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Сравнение систем оплаты

Параметр	Барьерная система взимания платы	Система взимания платы «Свободный поток»
Движение транспортного потока	Требует снижение скорости (остановки) транспортного средства для оплаты за проезд	Равномерное
Возможное количество пропущенных транспортных средств, авт./ч	350–1200	1800
Расходы	Затраты на устройство пункта взимания платы	Затраты на оборудования системы «Свободный поток»
Дорожно-транспортные происшествия	Увеличение количества ДТП, связанные с остановкой и маневрами транспортных средств	Снижение количества ДТП вследствие равномерного безостановочного движения
Экологическая обстановка	Повышается негативное воздействие на окружающую среду, связанное с частыми остановками и ускорениями транспортных средств в зоне взимания платы	Снижает негативное воздействие на окружающую среду благодаря равномерному и безостановочному движению
Количество оплаченных проездов	Приближается к 100 % (следует учитывать, что есть транспортные средства, которые имеют право бесплатного проезда)	90–95 %

Первое внедрение российской системы автоматизированного взимания платы «Свободный поток» осуществлено в рамках развития Центральной кольцевой автомобильной дороги (ЦКАД) Московской области [43]. В рамках проекта на трассе установлено 12 технологических модулей, каждый из которых включает видеорекамеры для фиксации проезда и распознавания госномеров; лазерные сканеры, измеряющие габариты и категорию транспортного средства; радиочастотные антенны для идентификации

транспондеров; вычислительные блоки, обрабатывающие данные в режиме реального времени и передающие их в централизованную платформу.

Система «Свободный поток» зарекомендовала себя как высокоэффективное решение за рубежом, демонстрируя повышенную пропускную способность, что подтверждается данными (Рисунок 3.7). В европейских странах эта технология получила широкое распространение [99; 104]. В то время как Южная Корея и Таиланд отдают предпочтение барьерным системам с физическими шлагбаумами, в Чили, Великобритании, Ирландии, США и Норвегии успешно внедрены безбарьерные методы взимания платы, основанные на автоматической идентификации транспорта [1].

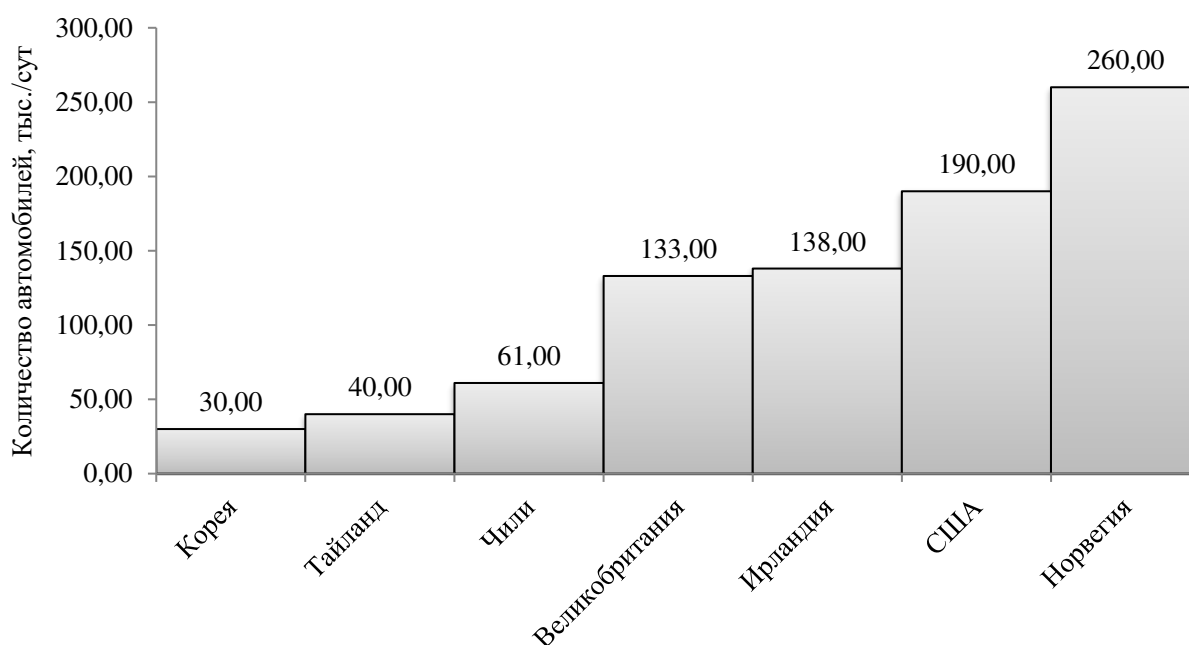


Рисунок 3.7 – Пропуск транспортных средств в сравнении с системой «Свободный поток»

Несмотря на значительные преимущества системы, её повсеместное внедрение сдерживается действующими нормативно-правовыми актами. Основной барьер – отсутствие законодательно утверждённого алгоритма, гарантирующего исключение случаев бесплатного проезда.

С 15 октября 2020 г. вступил в силу Федеральный закон № 326-ФЗ, утверждённый Советом Федерации 7 октября того же года. Данный нормативный акт внёс корректировки в ст. 29 и 40 Федерального закона «Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в РФ», а также в ряд

других законодательных положений. Согласно п. 5 ч. 1 ст. 29, введённому этим документом, движение по платным дорогам или их участкам запрещено для транспортных средств, не внесших установленную плату за проезд.

С 26 октября 2020 г. вступили в силу законодательные изменения, регулирующие порядок оплаты проезда по платным дорогам. В рамках новых правил на участках с барьерными системами (физическими шлагбаумами) оплата взимается непосредственно при въезде на платную трассу или при выезде с неё. Для безбарьерных участков предусмотрены два варианта: предоплата через электронные сервисы (транспондеры, мобильные приложения) и постоплата – внесение средств в течение пяти дней после завершения поездки.

На основании положений ст. 104 Конституции РФ, закрепляющей право Правительства на законодательную инициативу, в декабре 2019 г. Кабинет министров направил в Государственную Думу Федерального Собрания законопроект. Данный документ предусматривал поправки в Кодекс РФ об административных правонарушениях, направленные на введение санкций за уклонение от оплаты проезда по платным автодорогам и их участкам. В ходе пленарного заседания Госдумы 22 октября 2020 г. указанный законопроект бы принят в первом чтении.

Предложенный законопроект устанавливает меры административной ответственности за несоблюдение требований по оплате проезда по платным автомобильным дорогам. Согласно документу, уклонение от внесения платы за использование платных участков дорожной сети влечёт за собой применение штрафных санкций в диапазоне от 2,5 до 5,5 тыс. рублей.

Фиксация нарушений осуществляется с помощью автоматизированных технических систем, оснащённых функционалом для фото- и видеосъёмки. Эти средства контроля работают в автономном режиме, обеспечивая объективную регистрацию фактов неправомерного проезда.

3.4 Основные выводы по Главе 3

Пункты взимания платы играют важную роль в обеспечении надежности скоростного режима на платных автомобильных дорогах. Их работа напрямую влияет на равномерность транспортного потока, что является основным фактором для поддержания расчетных скоростей движения. К данным объектам предъявляются строгие требования, включая обеспечение бесперебойной высокой пропускной способности для исключения вынужденных снижений скорости и образования заторов, а также минимизацию времени взаимодействия с водителями. Это позволяет сократить количество маневров торможения и ускорения, способствуя поддержанию стабильного и безопасного скоростного режима на подъездах и на самой трассе. В проведенном исследовании были получены следующие результаты:

1. Адаптирована промышленная теория пространственной локализации А. Вебера к транспортной системе платных автомобильных дорог, при этом целевая функция трансформирована: вместо минимизации транспортных издержек доставки грузов в качестве ключевого критерия оптимизации размещения пунктов взимания платы введена минимизация дисперсии скоростей транспортного потока на километре дороги за счёт исключения зон принудительного торможения. В рамках предложенного подхода традиционные факторы – транспортные издержки (зависимость от расстояния и грузопотоков) и агломерационные эффекты (влияние крупных городов и промышленных центров) – дополнены дисперсией скоростей транспортного потока, что позволяет учитывать не только массу груза, но и потери от неоднородности движения.

2. Согласно полученным данным на трассе М-12 «Восток» (Дюртюли – Ачит), первый пункт целесообразно расположить на участке между рп. Октябрьским и г. Красноуфимском. Второй пункт требуется установить в районе п. Щучье Озеро для обслуживания жителей города Чернушки и поселка Октябрьского. Третий пункт необходим для организации въезда на

магистраль для городов Дюртюли и Бирск, в связи с чем его следует установить между этими населенными пунктами.

3. Для повышения надежности скоростного режима на трассе был проведен сравнительный анализ систем взимания платы. Установлено, что технология «Свободный поток» позволяет полностью исключить точки принудительного торможения перед пунктами оплаты, характерные для барьерной системы. Это обеспечивает поддержание расчетной скорости движения на всем протяжении дороги. Эффект от сохранения равномерного потока эквивалентен предотвращению потерь в 78 авт./ч.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НАДЕЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА

Современное развитие транспортной инфраструктуры характеризуется активным внедрением и расширением сети платных автомобильных дорог, что обусловлено необходимостью повышения эффективности транспортной системы. В этих условиях особую актуальность приобретает задача обеспечения надежности скоростного режима как ключевого показателя качества транспортного обслуживания.

Оценка эффективности внедрения инновационных решений в контексте обеспечения надежности скоростного режима предполагает определение эффективности на основе сопоставления показателей затрат и результатов инновационного проекта с традиционными решениями. Ключевым аспектом такой оценки является анализ влияния внедряемых инноваций на стабильность и предсказуемость скоростного режима движения.

В соответствии с положениями ОДМ 218.11.006-2021 «Методические рекомендации по оценке эффективности использования в дорожном хозяйстве инноваций и достижений научно-технического прогресса», эффективность инновационных разработок в дорожной отрасли определяется как уровень их соответствия поставленным целям и задачам различных заинтересованных сторон, включая общество в целом.

Основополагающим принципом оценки результативности нововведений является сравнительный анализ инновационных и традиционных подходов. Данная методика предполагает сопоставление сценариев «с традиционным решением» и «с инновационным решением» на каждом этапе жизненного цикла проекта. Такой подход позволяет объективно оценить преимущества и недостатки новых разработок по сравнению с устоявшимися практиками.

4.1 Оценка эффективности внедрения инновационных решений для обеспечения надежности скоростного режима

Платные автомобильные дороги призваны обеспечивать не только высокую пропускную способность, но и гарантированное качество транспортного сервиса. Ключевым параметром этого качества выступает надежность скоростного режима – способность дороги поддерживать движение транспортного потока с расчетными скоростями с минимальными отклонениями на протяжении всего жизненного цикла. Надежный скоростной режим является основой для соблюдения гарантированного времени в пути, повышения безопасности, снижения эксплуатационных затрат пользователей и минимизации динамического воздействия на дорожную одежду [6].

Однако на практике обеспечение стабильности скорости сталкивается с комплексом вызовов: ухудшением транспортно-эксплуатационного состояния покрытия, варьирующимися характеристиками транспортного потока, а также наличием локальных точек, вызывающих вынужденное изменение режима движения. Наиболее значимыми из таких точек на платных автомагистралях являются пункты взимания платы, традиционные барьерные системы которых становятся источниками торможения, неравномерности потока и снижения общей надежности дороги как системы.

Эффективность разработанных в ходе исследования инструментов – параметрических моделей управления надежностью дорожной одежды (см. Главу 2) и методики оптимизации размещения пунктов взимания платы на основе теории Вебера (см. Главу 3) – оценивается в соответствии с ключевыми задачами внедрения инноваций в дорожном хозяйстве. Эти задачи включают повышение качества и эксплуатационных характеристик объектов инфраструктуры, а также оптимизацию затрат на их жизненный цикл.

Ключевыми положительными последствиями внедрения инноваций являются:

1. Улучшение потребительских качеств платной автомобильной дороги достигается не столько поддержанием технических параметров (прочностью, ровностью, геометрическими характеристиками) как самоцелью, сколько управлением допустимым риском снижения скорости, связанным с изменением этих параметров. Стабилизация и повышение средней скорости движения, являющиеся ключевым потребительским свойством для пользователей платных трасс, обеспечиваются за счёт принятия решений, ориентированных не на абсолютные нормативы состояния покрытия, а на минимизацию вероятности отклонения скоростного режима ниже уровня, гарантирующего платёжеспособный спрос. Таким образом, управление транспортно-эксплуатационными параметрами приобретает характер экономико-вероятностного инструмента, позволяющего балансировать затраты на содержание дороги и потери дохода концессионера от недостижения договорного уровня сервиса.

2. Продление периода сохранения высоких потребительских качеств обеспечивается за счет использования предиктивных моделей изменения модуля упругости и ровности покрытия во времени. Это позволяет прогнозировать и планомерно воздействовать на темпы разрушения покрытия, не допуская снижения скорости ниже установленного предела.

3. Повышение эксплуатационных качеств отдельных элементов системы реализуется: для дорожной одежды – через управление параметрами надежности и однородности, что снижает коэффициент вариации и повышает устойчивость конструкции; для пунктов взимания платы – адаптированной теории локализации А. Вебера, учитывающей не только грузопотоки (массу), но и дисперсию скоростей транспортного потока как самостоятельный критерий оптимизации.

4. Продление межремонтного периода и общего срока эксплуатации становится возможным благодаря предиктивному управлению на основе моделей, описанных в Главе 2. Оптимизация размещения ПВП (см. Главу 3)

дополнительно снижает динамическую нагрузку на покрытие от циклов «торможение – разгон», что также способствует сохранению ресурса.

5. Снижение расходов формируется на двух уровнях: эксплуатационные расходы сокращаются за счет увеличения межремонтных сроков и более точного планирования работ на основе прогнозных моделей; сокращение временных потерь пользователей, а следовательно, и минимизация их транспортных издержек, достигается не только за счёт роста средней скорости, но прежде всего благодаря снижению дисперсии скоростного режима и исключению зон принудительного торможения в сочетании с технологией «Свободный поток».

6. Сокращение негативного экологического воздействия является следствием комплексного эффекта: повышение однородности и средней скорости транспортного потока снижает удельный расход топлива и объем вредных выбросов. Ликвидация заторов и точек принудительного торможения у ПВП вносит значительный вклад в достижение этого эффекта.

Таким образом, все виды эффектов от внедрения инноваций можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся финансовые эффекты, которые формируются за счёт экономии средств на разных этапах жизненного цикла объекта в расчётный период после внедрения инновационного решения:

$$\Delta Z_{nt} = \sum_{n=1}^N (Z_{nt}^{\text{тр}} - Z_{nt}^{\text{ин}}), \quad (4.1)$$

где $Z_{nt}^{\text{тр}}$, $Z_{nt}^{\text{ин}}$ – расходы, связанные с n -м видом работ в дорожной сфере (таких как строительство, реконструкция, капитальный и текущий ремонт, а также содержание), включая затраты на восстановление изношенных слоёв для обоих сравниваемых вариантов – традиционного и инновационного.

Снижение расходов на нормативное содержание платной автомагистрали при внедрении разработанных инструментов достигается за счет целенаправленного воздействия на следующие факторы:

1. Снижение количества дефектов в дорожной конструкции и темпа их развития. Этот эффект обеспечивается применением параметрических моделей управления надежностью, которые позволяют:

– прогнозировать изменение прочности (модуля упругости) и ровности покрытия во времени;

– заблаговременно планировать и реализовывать превентивные мероприятия, направленные на поддержание расчетных характеристик до момента критического накопления повреждений;

– повысить однородность конструкции (снизить коэффициент вариации), что статистически увеличивает ее устойчивость к возникновению деформаций.

2. Уменьшение периодичности и объема определенных видов ремонтно-восстановительных работ. Этому способствует комплексное воздействие:

– предиктивное управление позволяет перейти от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, оптимизируя межремонтные интервалы;

– оптимальное размещение пунктов взимания платы и внедрение технологии «Свободный поток» устраняют зоны принудительного торможения и разгона. Это приводит к снижению динамических ударных нагрузок на дорожную одежду от транспортных средств, что напрямую сокращает износ покрытия и, как следствие, частоту работ по устранению деформаций на подходах к ПВП.

Вторая группа объединяет социально-экономические и экологические результаты, которые формируются как прямое следствие повышения надежности скоростного режима. Эти результаты представляют собой конечные выгоды для общества, пользователей дороги и окружающей среды. Рассматриваемую группу можно классифицировать следующим образом, основываясь на полученных результатах:

1. Транспортные эффекты, возникающие вследствие повышения средней скорости движения и стабильности транспортного потока:

– снижение потребности в капиталовложениях в автотранспортный комплекс благодаря росту производительности подвижного состава. Увеличение эксплуатационной скорости и устранение задержек у ПВП позволяют выполнять больший объем перевозок тем же парком транспортных средств;

– снижение издержек при перевозке грузов и пассажиров достигается за счет комплексного улучшения состояния дороги: повышение ровности покрытия уменьшает расход топлива и амортизацию, а исключение остановок у ПВП сокращает время в пути и операционные затраты логистических компаний.

2. Социальные эффекты, непосредственно влияющие на качество жизни и безопасность граждан:

– сокращение времени нахождения пассажиров в пути является прямым результатом роста средней скорости и ликвидации временных потерь на проезд через ПВП;

– сокращение последствий дорожно-транспортных происшествий обеспечивается за счет двух ключевых факторов: повышение однородности скоростного потока благодаря управлению геометрическими параметрами; устранение конфликтных точек и маневров резкого торможения/перестроения в зонах традиционных ПВП за счет их оптимального размещения и безбарьерной технологии.

3. Экологические эффекты в сопутствующих отраслях, связанные со снижением антропогенной нагрузки:

– снижение совокупного ущерба окружающей среде происходит из-за сокращения вредных выбросов. Это достигается благодаря более экономичному режиму движения транспортных средств: равномерное движение с повышенной скоростью и отсутствие частых разгонов в очередях

на ПВП ведут к значительному уменьшению расхода топлива и объема выхлопов.

В целях унификации вычислений при анализе социально-экономических результатов были применены единые обозначения соответствующих показателей, а также ссылки на исходные информационные массивы. Перечень используемых параметров и алгоритмов расчетов соответствует положениям ОДМ 218.4.023-2015 «Методические рекомендации по оценке эффективности строительства, реконструкции, капитального ремонта и ремонта автомобильных дорог».

Величина экономии капитальных вложений в автомобильный транспорт на t -м шаге расчетного периода определяется по формуле:

$$\Delta K_{at} = K_{ait}^{TP} - K_{ait}^{ин}, \quad (4.2)$$

где $K_{ait}^{TP}, K_{ait}^{ин}$ – объем капиталовложений в автотранспортный комплекс, требуемый для организации перевозки грузов и пассажиров по автомобильной дороге при использовании традиционного и инновационного подходов.

Расчет капитальных затрат в автотранспортный комплекс, соответствующих объему перевозок на отдельных участках в начальный год эксплуатации или в любой другой выбранный период, выполняется по формуле:

$$K_{at} = 365 \sum_{j=1}^J \frac{A_{jt} N_{jt} L}{T_{aj} V_{jt}}, \quad (4.3)$$

где A_{jt} – удельные капиталовложения в автотранспортный комплекс на единицу подвижного состава j -го типа, включая производственную инфраструктуру и транспортные средства;

N_{jt} – среднесуточная за год интенсивность движения транспортных средств категории j на рассматриваемом отрезке дороги, авт./сут;

L – длина автомобильной трассы, км;

T_{aj} – продолжительность эксплуатации единицы транспорта на маршруте в течение заданного периода, ч;

V_{jt} – средняя эксплуатационная скорость транспортных средств j -го типа на рассматриваемом участке, км/ч.

Объем ежегодных дополнительных инвестиций в основной капитал автотранспорта, необходимых для наращивания грузооборота в году t , рассчитывается пропорционально величине этого увеличения:

$$\delta K_{at} = K_{at} - K_{a(t-1)}. \quad (4.4)$$

Эффект, возникающий при сокращении затрат на грузовые и пассажирские перевозки в период t , рассчитывается по формуле:

$$\Delta C_{at} = C_{at}^{\text{ТР}} - C_{at}^{\text{ИН}}. \quad (4.5)$$

где $C_{at}^{\text{ТР}}, C_{at}^{\text{ИН}}$ – расходы на организацию перевозок грузов и пассажиров по автомобильной дороге при использовании традиционного и инновационного подходов.

Расходы на организацию грузоперевозок на временном интервале t определяются по формуле:

$$C_{at} = 365 \sum_{j=1}^J N_{jt} S_{jt} L, \quad (4.6)$$

где N_{jt} – среднесуточная за год интенсивность движения транспортных средств категории j на рассматриваемом отрезке дороги, авт./сут;

L – длина автомобильной трассы, км;

S_{jt} – стоимость одного километра пробега для транспортного средства j -й категории.

Расчетное значение стоимости километра пробега для автомобиля типа j в определенных дорожных условиях определяется по следующей формуле:

$$S_j = S_{\text{пер}j} + \frac{S_{\text{пост}j} + d_j}{V_j}, \quad (4.7)$$

где $S_{\text{пер}j}$ – расчетная величина переменных расходов на километр пробега для автомобиля типа j ;

$S_{\text{пост}j}$ – расчетная величина постоянных издержек (не связанных с пробегом) на 1 ч нахождения автомобиля j -го типа в эксплуатационном состоянии;

d_j – почасовая оплата труда водителя транспортного средства типа j с учетом дополнительных начислений;

V_j – средняя эксплуатационная скорость транспортных средств j -го типа на рассматриваемом участке, км/ч.

Эффект, возникающий в результате снижения времени нахождения пассажиров в пути в период t , рассчитывается по формуле:

$$\Delta P_t = P_{it}^{\text{ТР}} - P_{it}^{\text{ИН}}, \quad (4.8)$$

где $P_{it}^{\text{ТР}}, P_{it}^{\text{ИН}}$ – потери общества, связанные с продолжительностью поездок граждан на i -м участке дорожной магистрали в условиях применения традиционного и инновационного подходов.

Ежегодные потери от затрат времени жителей на поездки по отдельным участкам трассы рассчитываются согласно формуле

$$P_t = 365 C_t^{\text{ПАС}} \cdot \left(\frac{N_t^{\text{Л}} B^{\text{Л}} L}{V_t^{\text{Л}}} + \frac{N_t^{\text{АВТ}} B^{\text{АВТ}} L}{V_t^{\text{АВТ}}} \right), \quad (4.9)$$

где $C_t^{\text{ПАС}}$ – усредненная величина экономических потерь, приходящаяся на 1 чел./ч нахождения пассажиров в пути;

$N_t^{\text{Л}}, N_t^{\text{АВТ}}$ – среднесуточная за год интенсивность движения легкового транспорта и автобусов на рассматриваемом участке, ед./сут;

$B^{\text{Л}}, B^{\text{АВТ}}$ – среднестатистическое число пассажиров, приходящееся на один легковой автомобиль и автобус;

$V_t^{\text{Л}}, V_t^{\text{АВТ}}$ – показатель скорости перемещения легкового транспорта и автобусов на заданном отрезке дороги, км/ч.

Эффект от сокращения числа дорожно-транспортных происшествий вследствие улучшения состояния дорожной инфраструктуры в расчетном периоде t рассчитывается по формуле:

$$\Delta \Pi_t = \sum_{i=1}^n (\Pi_{it}^{\text{ТР}} - \Pi_{it}^{\text{ИН}}), \quad (4.10)$$

где $\Pi_{it}^{\text{ТР}}, \Pi_{it}^{\text{ИН}}$ – величина ущерба от дорожно-транспортных происшествий на i -м участке автомобильной дороги при реализации традиционного и инновационного подходов.

Расчет ущерба от дорожно-транспортных происшествий на отдельных участках автомобильной дороги производится по формуле:

$$P_{it} = 3,65 \cdot 10^{-4} Z \cdot P_{cpt} \cdot M_t \cdot N_{it} \cdot L_{yi}, \quad (4.11)$$

где Z – число аварийных случаев на каждый миллион километров пробега транспортных средств;

P_{cpt} – усредненный ущерб от единичного случая дорожной аварии в году t ;

M_t – итоговый коэффициент стоимости, принимающий во внимание уровень серьезности дорожных аварий;

N_{it} – среднесуточная за год интенсивность движения транспортных средств категории на рассматриваемом отрезке дороги, авт./сут;

L_{yi} – протяженность участка автомобильной дороги с однородными условиями, км.

Понятие «потребительские свойства автомобильной дороги» закреплено ГОСТ 33388-2015 «Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению диагностики и паспортизации». Под потребительскими свойствами дороги понимается комплекс её транспортно-эксплуатационных характеристик, которые напрямую определяют эффективность и безопасность автомобильных перевозок, а также учитывают интересы участников дорожного движения и степень воздействия на экологию.

Скорость и безопасность движения являются основными потребительскими свойствами автомобильной дороги. В качестве комплексного показателя, который учитывает все ключевые транспортно-эксплуатационные характеристики, используется скорость движения. Её выражают через коэффициент обеспеченности расчётной скорости.

Согласно расчетной методике профессора А. П. Васильева [56], средняя скорость транспортного потока рассчитывается по формуле:

$$V_i = V_{\max} - t\sigma_V - \Delta V, \quad (4.12)$$

где V_{\max} – максимально возможная скорость одиночного автомобиля, которая фактически обеспечивается дорожным сооружением в его текущем состоянии (км/ч), определяется по формуле:

$$V_{\max} = 120K_{\text{pc}}^{\text{итог}}, \quad (4.13)$$

где 120 – базовая скорость движения одиночного легкового автомобиля, принятая для расчета, км/ч;

$K_{\text{pc}}^{\text{итог}}$ – итоговый коэффициент обеспечения расчетной скорости;

t – коэффициент доверительной вероятности;

σ_V – среднеквадратическое отклонение скорости движения свободного транспортного потока, км/ч;

ΔV – показатель, учитывающий воздействие интенсивности и состава транспортного потока на скорость движения (км/ч), определяется по формуле:

$$\Delta V = 120\Delta K_{\text{pc}}, \quad (4.14)$$

Для определения средней скорости транспортного потока на отрезке автомобильной дороги протяженностью L , подвергающемся инновационным изменениям, применяется формула:

$$\Delta V = 1 / \sum_{i=1}^I \frac{a_i}{V_i}, \quad (4.15)$$

где V_i – среднее значение скорости транспортного потока на i -м участке автомобильной дороги;

a_i – доля протяженности i -го характерного участка автомобильной дороги (с однородными условиями движения) к общей протяженности L ;

i – количество участков.

На i -м участке итоговый коэффициент, обеспечивающий расчетную скорость, определяется как минимальное значение среди всех частных коэффициентов данного участка, в соответствии с формулой:

$$K_{\text{rc}i}^{\text{итог}} = \min (K_{\text{rc}1}, K_{\text{rc}2}, K_{\text{rc}3}, K_{\text{rc}4}, K_{\text{rc}5}, K_{\text{rc}6}, K_{\text{rc}7}, K_{\text{rc}8}, K_{\text{rc}9}, K_{\text{rc}10}), \quad (4.16)$$

где $K_{\text{rc}1} - K_{\text{rc}10}$ – частные коэффициенты, каждый из которых учитывает определенный фактор: $K_{\text{rc}1}$ – ширину дорожного полотна или габарит

мостового сооружения; $K_{рс2}$ – ширину и техническое состояние обочин; $K_{рс3}$ – интенсивность движения и состав транспортного потока; $K_{рс4}$ – значения продольных уклонов и расстояние видимости покрытия; $K_{рс5}$ – геометрические характеристики плана трассы (радиусы кривых и уклон виража); $K_{рс6}$ – ровность дорожного покрытия в продольном направлении; $K_{рс7}$ – коэффициент сцепления колеса с дорожным покрытием; $K_{рс8}$ – прочностные характеристики дорожной одежды; $K_{рс9}$ – поперечную ровность покрытия (глубину колеи); $K_{рс10}$ – безопасность дорожного движения.

Значения частных коэффициентов, определяющих обеспеченность расчетной скорости транспортных потоков на автомобильных дорогах, регламентируются действующими нормами проектирования, а также техническими и эксплуатационными требованиями.

Следовательно, для анализа влияния внедряемого инновационного решения на транспортно-эксплуатационные показатели требуется установить, как изменяются значения частных коэффициентов обеспеченности расчетной скорости.

Анализ изменений частных коэффициентов расчетной скорости, достигаемых за счет применения инструментов, разработанных в Главах 2 и 3, позволяет не только оценить их общую эффективность, но и обосновать целесообразность их внедрения.

В рамках данного исследования ситуация, когда рост отдельных коэффициентов не приводит к увеличению итогового коэффициента, принципиально исключена. Это связано с тем, что инструменты направлены именно на улучшение тех параметров, которые являются лимитирующими для скорости на платных автомагистралях:

1. Первоочередное внедрение инструментов Главы 3 (оптимизация ПВП) целесообразно, когда основным ограничением являются заторы на подходах к традиционным пунктам взимания платы ($K_{рс3}$). Устранение этого

ограничения через оптимальное размещение и технологию «Свободный поток» дает прирост итогового коэффициента и скорости.

2. Параллельное или последующее применение инструментов Главы 2 (параметрическое управление) направлено на системное повышение коэффициентов, определяющих сохранение скоростных качеств: $K_{рс6}$ (ровность дорожного покрытия) и $K_{рс1}$, $K_{рс4}$, $K_{рс5}$ (геометрические параметры). Их улучшение обеспечивает устойчивый рост итогового коэффициента в течение всего жизненного цикла.

Эффективность внедрения инновационных инструментов, разработанных в Главах 2 и 3, оценивается с помощью ключевых инвестиционных критериев, в основе которых лежит сопоставление дополнительных капитальных вложений с совокупными выгодами, полученными на всех этапах жизненного цикла платной автомагистрали. Главным интегральным финансовым критерием такой оценки выступает чистый дисконтированный доход.

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) – накопленные дисконтированные выгоды от внедрения инновации, определяемые как разница между результатами и затратами на протяжении всего жизненного цикла объекта внедрения инновации, где суммирование распространяется на все шаги расчетного периода.

Его расчёт для предложенного комплекса инноваций принципиально отличается от стандартных оценок, поскольку базируется на количественно прогнозируемых результатах применения конкретных инструментов:

1. Инвестиционная составляющая формируется за счёт:

– повышения стоимости строительства, связанного с реализацией решений по управлению геометрическими параметрами для повышения однородности потока;

– затрат на внедрение системы оптимального размещения ПВП и технологии «Свободный поток».

2. Результирующая составляющая рассчитывается на основе прямых и косвенных выгод:

- прямая финансовая экономия: снижение эксплуатационных расходов на содержание и ремонт благодаря предиктивному управлению надёжностью дорожной одежды и уменьшению её износа от устранения торможений у ПВП;

- рост доходов оператора: повышение привлекательности трассы для пользователей за счёт гарантированной высокой средней скорости и отсутствия задержек, что может увеличить интенсивность платной автомобильной дороги;

- социально-экономические эффекты, поддающиеся денежной оценке: сокращение транспортных издержек пользователей и ущерба от ДТП, рассчитанные на основе конкретного прироста скорости и снижения аварийности.

Расчет ЧДД производится на основании формулы:

$$\text{ЧДД} = \sum_{i=0}^T (R_t - Z_t)(1 + E)^{-t}, \quad (4.17)$$

где R_t – эффект, полученный от реализации инновации на t -м этапе расчетного периода;

Z_t – сопутствующие издержки внедрения инновации на соответствующем этапе, включая потенциальные убытки от негативных последствий её реализации, а также расходы на их ликвидацию;

E – дисконтная ставка;

T – период проведения расчетов (временной интервал для сопоставления традиционного и инновационного сценариев), устанавливаемый, исходя из продолжительности жизненного цикла проекта;

t – порядковый номер этапа вычислений, привязанный к конкретному этапу жизненного цикла.

Оценка эффективности предложенных решений производилась на примере трассы М-12 «Восток» на участке Дюргюли – Ачит (км 90 – км 140).

Продолжительность жизненного цикла предлагаемого инновационного решения установлена в 12 лет.

Затраты на выполнения работ по содержанию, ремонту и капитальному ремонту были приняты на основании доклада о стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, ремонта и содержания 1 км автомобильной дороги общего пользования Российской Федерации (2024), подготовленные Министерством транспорта Российской Федерации [40].

При формировании стоимости выполнения работ (содержание, ремонт, капитальный ремонт) были учтены следующие факторы ценообразования:

1. Геометрические характеристики автомобильной дороги (ширина проезжей части, радиусы кривых, продольные уклоны). Их влияние на стоимость оценивалось с учетом установленных в Разделе 2.1 количественных зависимостей скорости от этих параметров. Инвестиции в оптимизацию геометрических параметров обосновываются не только нормативами, но и прямым расчётным приростом скорости и снижением дисперсии, что в долгосрочной перспективе сокращает эксплуатационные расходы.

2. Конструкция дорожной одежды и прогноз её состояния. Стоимость её содержания и ремонтов определялась с применением предиктивных моделей изменения модуля упругости и ровности покрытия, разработанных в Главе 2. Это позволило перейти от усреднённых нормативных сроков ремонта к оптимизированному графику, основанному на прогнозе фактического снижения надёжности, что минимизирует совокупные затраты на жизненный цикл.

3. Снижение динамической нагрузки на конструкцию дорожной одежды и, как следствие, затрат на материалы и ремонты. Этот фактор был учтен опосредованно, через эффект от внедрения решений Главы 3. Оптимальное размещение ПВП и система «Свободный поток» устраняют циклы «торможение – разгон», что снижает ударные нагрузки и образования колеи. Это позволяет прогнозировать уменьшение частоты и объёмов

работ по восстановлению покрытия, особенно в зонах влияния пунктов оплаты, что напрямую влияет на сметную стоимость содержания.

Повышение сметной стоимости проекта при внедрении инновационного решения полностью относится к стадии строительства. Это увеличение является прямым следствием реализации мероприятий, разработанных на основе инструментов параметрического управления (Глава 2) и требует дополнительных инвестиций. В частности, усовершенствование геометрических параметров трассы (оптимизация ширины, уклонов, радиусов кривых в соответствии с зависимостями, установленными в разделе 2.1) для повышения однородности потока и целевой надежности приводит к увеличению объема строительных работ. Расчетная величина этих дополнительных капитальных вложений составляет 6 988,72 тыс. рублей.

В соответствии с принципами анализа жизненного цикла, эти первоначальные инвестиции создают основу для значительного снижения ежегодных эксплуатационных расходов, формируя положительный экономический поток в последующие периоды. Данное снижение достигается за счет двух ключевых факторов, обоснованных в исследовании:

- снижение расходов на содержание дорожной одежды благодаря применению предиктивных моделей, позволяющих оптимизировать график и объем ремонтов;

- сокращение потерь, связанных с задержками транспорта, за счет внедрения оптимальной схемы размещения ПВП и технологии «Свободный поток», что минимизирует износ покрытия в зонах пунктов взимания оплаты.

Ключевым итоговым финансовым показателем, объединяющим разновременные затраты и результаты, выступает чистый дисконтированный доход. Его положительное значение, достигающее 11 234,35 тыс. рублей, доказывает экономическую целесообразность произведенных инвестиций. Чистый дисконтированный доход сформирован именно за счет синергетического эффекта от применения комплекса инструментов: роста средней скорости движения (и, как следствие, снижения транспортных

издержек пользователей) и сокращения эксплуатационных расходов, количественно оцененных на основе результатов, полученных в Главах 2 и 3. Таким образом, дополнительные капитальные вложения полностью окупаются в течение расчетного периода за счет генерируемых ими же эксплуатационных и социально-экономических выгод.

Результаты выполненных вычислений представлены в Приложении 2.

4.2 Основные выводы по Главе 4

В рамках данной главы выполнена оценка эффективности обеспечения надежности скоростного режима, ориентированная исключительно на условия платных автомобильных дорог, где коммерческая эффективность проекта напрямую зависит от стабильности скоростного режима и платёжеспособного спроса. Предложенные методики, в отличие от подходов, применяемых на дорогах общего пользования, учитывают экономическую значимость сохранения скорости и допустимый риск её снижения. В проведенном исследовании были получены следующие результаты:

1. Установлено, что внедрение параметрических моделей управления надежностью дорожной одежды и методики оптимизации размещения пунктов взимания платы генерирует многокомпонентный положительный эффект только в условиях платной концессионной модели, где целевым ориентиром является не просто поддержание проезжего состояния, а гарантированное обеспечение договорного уровня скорости. Ключевыми результатами являются: повышение надежности скоростного режима как основы сохранения платёжеспособного спроса, продление межремонтных сроков за счёт точного прогноза модуля упругости, ориентированного на сохранение скорости, снижение эксплуатационных затрат, а также получение социально-экономических и экологических выгод. На дорогах общего пользования, где отсутствует прямая зависимость дохода от стабильности скоростного режима, применение подобного подхода экономически не обосновано.

2. Эффективность внедрения обоснована через влияние на частные коэффициенты обеспеченности расчетной скорости. Применяемые инструменты целенаправленно улучшают частные коэффициенты, что гарантирует рост итогового коэффициента и, как следствие, средней скорости транспортного потока. Для платной дороги такое управление коэффициентами является инструментом управления доходностью, тогда как для бесплатных магистралей аналогичные мероприятия не дают сопоставимого коммерческого эффекта.

3. Интегральная финансовая оценка на примере трассы М-12 «Восток» на участке Дюртюли – Ачит (км 90 – км 140) подтвердила экономическую целесообразность внедрения разработанной методики именно для платного проекта. Экономический эффект от внедрения составил 224,69 тыс. руб. на 1 км за счёт увеличения межремонтных сроков с шести до восьми лет, что стало возможным благодаря более точному прогнозу модуля упругости, ориентированному не на нормативные минимумы, а на сохранение целевого скоростного режима. Несмотря на рост капитальных затрат на 6 988,72 тыс. руб., синергетический эффект от инноваций обеспечивает положительный чистый дисконтированный доход в размере 11 234,35 тыс. руб., что свидетельствует об окупаемости дополнительных инвестиций и финансовой эффективности проекта. Для дорог общего пользования, где отсутствует механизм возврата инвестиций через платёжеспособный спрос, достижение подобных финансовых показателей невозможно, а применение разработанной методики нецелесообразно.

Заключение

В диссертационном исследовании разработан и научно обоснован метод управления транспортно-эксплуатационными параметрами платных автомобильных дорог для обеспечения надежности повышенного скоростного режима.

Основные научно-практические результаты состоят в следующем:

1. Выявлены и систематизированы ключевые транспортно-эксплуатационные параметры платных автомобильных дорог, определяющие скоростной режим, на основе анализа зарубежного и отечественного опыта их проектирования и эксплуатации.

Анализ мирового опыта показывает, что при проектировании и эксплуатации платных автодорог все страны стремятся к одним и тем же целям: высокой скорости, безопасности и комфорту. Однако пути их достижения могут различаться в зависимости от национальных особенностей. Общей технологической тенденцией является переход к бесперебойному движению, где ключевую роль играет система взимания платы «Свободный поток», так как именно она позволяет реализовать эти базовые принципы на практике.

2. Разработана параметрическая модель управления надежностью скоростного режима платных автомагистралей на основе установления количественных зависимостей между транспортно-эксплуатационными параметрами дорожной одежды, геометрическими характеристиками трассы и динамикой скоростных показателей транспортного потока.

Выявлены закономерности влияния интенсивности движения на скоростной режим: при свободном движении распределение скоростей является асимметричным и имеет широкий разброс; по мере роста интенсивности распределение становится более симметричным, приближаясь к нормальному закону, при этом разброс значений скорости существенно уменьшается.

Выявлены временные интервалы с максимальной стабильностью транспортного потока (10:00–16:00 в суточном цикле, вторник – четверг в недельном цикле) на платных дорогах.

3. Разработана и обоснована методика оптимального размещения пунктов взимания платы на платных автомобильных дорогах, учитывающая дисперсию скоростей транспортного потока как самостоятельный критерий оптимизации. Новизна подхода заключается в том, что целевой функцией выступает минимизация дисперсии скоростей транспортного потока на километре дороги за счёт исключения зон принудительного торможения. Это позволяет обосновать размещение ПВП не в точке минимума транспортных затрат,

а в зоне устойчивого равновесия, где потери от циклов «торможение – разгон» компенсируются агломерационными эффектами.

Установлено, что технология «Свободный поток» позволяет полностью исключить точки принудительного торможения перед пунктами оплаты, характерные для барьерной системы.

4. Проведена комплексная оценка эффективности предложенных инструментов (параметрической модели и методики размещения ПВП) исключительно в условиях платной автомобильной дороги, где целевым ориентиром является не просто поддержание транспортно-эксплуатационного состояния, а гарантированное обеспечение скоростного режима как основы сохранения платёжеспособного спроса и доходности концессионера.

Применение параметрических моделей для управления надежностью дорожной одежды в сочетании с оптимизированной методикой размещения пунктов взимания платы обеспечивает комплексный синергетический эффект, достижимый только в рамках платной концессионной модели. Это выражается в повышении стабильности скоростного режима, увеличении межремонтных интервалов, сокращении эксплуатационных расходов.

Список литературы

1. Автономная некоммерческая организация «Агентство по техническому развитию». Безбарьерная система взимания платы на автомобильных дорогах «Свободный поток» // Роль и место интеллектуальных транспортных систем в сети автомобильных дорог Российской Федерации. Современные тенденции развития, 3–4 декабря 2019. – Москва, 2019.
2. Аналитический отчёт по итогам исследования состояния и перспектив развития рынка интеллектуальных транспортных систем (ИТС) (системы управления трафиком, дорожной инфраструктурой, парковками, системы управления движением пассажирского транспорта, системы взимания платы за проезд, системы активной и кооперативной безопасности, системы видеонаблюдения и распознавания знаков и пр.), а также оценки влияния на развитие российского и международного рынка «Автонет» / Ассоциация разработчиков, производителей и потребителей оборудования и приложений на основе глобальных навигационных спутниковых систем «ГЛОНАСС/ГНСС – Форум». – Москва, 2019. – С. 511.
3. Берман, Н. Д. Решение задач оптимизации транспортной логистики в mathcad prime 3.1 (на примере транспортной задачи) / Н. Д. Берман, Т. С. Кузьминых // Наука и Просвещение : сборник статей победителей VII Международного научно-практического конкурса. – 2017. – С. 12–16.
4. Боброва, Т. В. Параметрическое моделирование как инструмент управления транспортно-эксплуатационными показателями автомобильных дорог / Т. В. Боброва, В. И. Брызгалов // Construction and Geotechnics. – Пермь, 2025. – № 4. – С. 64–79.
5. Более 60 процентов автомобилистов для проезда по платным дорогам пользуются транспондерами // Государственная компания «Автодор» [сайт]. – URL : <https://russianhighways.com/press/news/78061/> (дата обращения: 06.07.2024).

6. Брызгалов, В. И. Анализ экономической эффективности платных автомобильных дорог / В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко, А. М. Бургонутдинов // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : сборник материалов IX Международной научно-практической конференции, приуроченной к 120-летию со дня рождения К. А. Артемьева. – Омск : СибАДИ, 2024. – С. 310–315.

7. Брызгалов, В. И. Применение теории Вебера при расположении пунктов взимания платы на автомобильных дорогах / В. И. Брызгалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – Пермь, 2024. – № 4. – С. 71–83.

8. Брызгалов, В. И. Оптимальное расположение платных автомобильных дорог / В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко, А. М. Бургонутдинов // Химия. Экология. Урбанистика : материалы международной научно-практической конференции. – Пермь : ПНИПУ, 2023. – С. 105–110.

9. Брызгалов, В. И. Оптимальное расположение пунктов взимания платы на платных автомобильных дорогах / В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко, А. М. Бургонутдинов // Химия. Экология. Урбанистика : материалы всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Пермь, 2024. – С. 53–56.

10. Брызгалов, В. И. Особенности платных дорог для автомобильного транспорта на основе анализа российского и мирового опыта / В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко // Транспорт и транспортно-технологические системы : материалы Международной научно-технической конференции. – Тюмень, 2020. – С. 58–61.

11. Брызгалов, В. И. Оценка коммерческой эффективности строительства платной автомобильной дороги на территории Пермского края /

В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – Пермь, 2020. – № 1. – С. 5–17.

12. Брызгалов, В. И. Платные дороги и их экономическая эффективность / В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко, А. М. Бургонутдинов // Известия КГАСУ. – Пермь, 2025. – № 1 (71). – С. 29–40.

13. Брызгалов, В. И. Преимущества системы «Свободный поток» на платных автомобильных дорогах / В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко // Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России : материалы XV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Волгоград : ВолгГТУ, 2021. – С. 123–129.

14. Брызгалов, В. И. Применение теории Вебера при расположении пунктов взимания платы на платных дорогах / В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко, А. М. Бургонутдинов // Известия КГАСУ. – Пермь, 2025. – № 2 (72). – С. 202–211.

15. Брызгалов, В. И. Размещение пунктов взимания платы на автомобильных дорогах с применением теории Вебера / В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко, А. М. Бургонутдинов // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных : сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к празднованию 300-летия Российской академии наук. – Омск, 2024. – С. 201–204.

16. Брызгалов, В. И. Расчет количества полос в зоне взимания платы на участке платной автомобильной дороги в г. Перми / В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко // Современные технологии в строительстве. Теория и практика : материалы XII Всероссийской молодежной конференции аспирантов, молодых ученых и студентов. – Пермь, 2020. – С. 70–75.

17. Брызгалов, В. И. Сравнение систем Free Flow и Fast Lane / В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе : материалы международной научно-практической конференции. – Пермь : ПНИПУ, 2020. – С. 275–278.

18. Брызгалов, В. И. Схема размещения пункта взимания платы на платной автомобильной дороге на территории г. Перми / В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко // Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России : материалы XIV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Волгоград : ВолгГТУ, 2020. – С. 97–103.

19. Брызгалов, В. И. Устройство безбарьерной системы оплаты на платных автомобильных дорогах Пермского края / В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – Пермь, 2021. – № 1. – С. 5–15.

20. Брызгалов, В. И. Формирование тарифов за проезд по платной автомобильной дороге / В. И. Брызгалов, М. О. Карпушко, А. М. Бургунутдинов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – Пермь, 2023. – № 4. – С. 62–73.

21. Васильев А. П. Эксплуатация автомобильных дорог : учебник для студ. высш. учеб. заведений : в 2 т. / А.П. Васильев. – Москва : Издательский центр «Академия», 2010. – Т. 1. – 320 с.

22. Власов, С. С. Применение системы массового обслуживания при определении оптимального количества пунктов сбора платы за проезд на платном участке дороги / С. С. Власов, В. В. Гасилов, Б. А. Бондарев // Новые материалы и технологии в машиностроении. – Брянск, 2006. – № 6. – С. 108–111.

23. Власов, С. С. Методы экспертных оценок при экономическом обосновании строительства платных дорог в условиях государственно-частного партнерства / С. С. Власов // Новые материалы и технологии в машиностроении. – Брянск, 2006. – № 6. – С. 104–108.

24. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва, 1981. – 263 с.

25. ГОСТ Р 56294-2014. Интеллектуальные транспортные системы. Требования к функциональной и физической архитектурам интеллектуальных транспортных систем / Стандартиформ. – Москва, 2015.

26. Гусейналиев, В. А. Выбор альтернативного маршрута при определении тарифов за проезд по платному дорожному сооружению / В. А. Гусейналиев // Вестник Московского автомобильно-дорожного института (Государственного технического университета). – Москва, 2003. – С. 52–55.

27. Дингес, Э. В. Экономическое обоснование количества пунктов сбора платы за проезд по дорожным сооружениям / Э. В. Дингес, А. В. Степанов // Дороги и мосты. – Москва, 2006. – № 2. – С. 19–29..

28. Домке, Э. Р. Управление качеством дорог: учеб. пособие / Э. Р. Домке, А. П. Бажанов, А. С. Ширшиков. – Ростов-на-Дону, 2006. – 253 с.

29. Жаденова, С. В. Обоснование параметров, определяющих эффективность функционирования платной автомобильной дороги : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.11 / С. В. Жаденова. – Волгоград : Издательство ВГАСА, 2003.

30. Иностранно.ру [сайт]. – URL : <https://inostranno.ru/2014/05/road-toll-payment-in-czech/> (дата обращения: 06.07.2024).

31. Исследование изменений показателей эксплуатационного состояния дорожных одежд и покрытий с обоснованием методики их программирования / О. А. Красиков, Ю. М. Яковлев, М. С. Коганзон [и др.]. – Алма-Ата : НТО Казфилиала Союздорнии, 1990. – 92 с.

32. Казаковцев, Л. А. Решение задачи Вебера для специальных случаев размещения на плоскости / Л. А. Казаковцев, М. Н. Гудыма // Решетневские чтения: материалы международной научно-практической конференции. – Красноярск, 2014. – С. 52–53.

33. Калинина, В. В. Методика определения количества полос в зоне взимания платы для участков платных дорог с явно выраженной суточной,

недельной и сезонной неравномерностью / В. В. Калинина // Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 6. – С. 78–82.

34. Калинина, В. В. Методика определения количества полос в зоне взимания платы на платных дорогах / В. В. Калинина // Транспорт Урала. – Екатеринбург, 2015. – С. 106–108.

35. Коганзон, М. С. Экспериментальное исследование прочности и ровности нежестких дорожных одежд / М. С. Коганзон, А. Аблакулов // Пути повышения надежности автомобильных дорог : сб. научн. тр. – Москва : МАДИ, 1984. – С. 16–22.

36. Кондратенко, Т. Е. Определение геометрических параметров пунктов пропуска платных автомобильных дорог / Т. Е. Кондратенко // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – Хабаровск, 2019. – № 1-1. – С. 271–275.

37. Корреспонденция счетов: Нормативно-правовое регулирование // КонсультантПлюс [сайт]. – URL : <http://www.consultant.ru/law/consult/cm/cm20151218/article30748/> (дата обращения: 06.07.2024).

38. Красиков, О. А. Мониторинг и стратегия ремонта автомобильных дорог / О. А. Красиков. – Алматы : КазгосИНТИ, 2004. – 263 с.

39. Методические рекомендации по строительству и размещению пунктов взимания платы за проезд / Министерство транспорта Российской Федерации государственная служба дорожного хозяйства (Росавтодор). – Москва, – 2003. – С. 31.

40. Министерство транспорта Российской Федерации [сайт]. – URL : <https://mintrans.gov.ru/documents/7/14517?type=7> (дата обращения: 08.08.2025).

41. Мониторинг, диагностика и оценка состояния автомобильных дорог: учебное пособие / С. В. Ефименко, В. Н. Ефименко, В. С. Чурилин, М. В. Бадина. – Томск : ТГАСУ, 2003. – 128 с.

42. На ряде участков трасс М-11 и М-4 разрешенная скорость движения вырастет до 130 км/ч // Государственная компания «Автодор»

[сайт]. – URL : <https://russianhighways.ru/press/news/82736/> (дата обращения: 06.07.2024).

43. ООО «Автодор – Платные Дороги»: На Центральной кольцевой автомобильной дороге внедрена система взимания платы «Свободный поток» [сайт]. – URL : <https://avtodor-tr.ru/press-center/smi/na-tsentralnoy-koltsevoy-avtomobilnoy-doroge-vnedrena-sistema-vzimaniya-platy-svobodnyu-potok-/> (дата обращения: 06.07.2024).

44. Осиновская, В. А. Влияние вибрации нежестких дорожных одежд на их прочность: Научное исследование / В. А. Осиновская // Москва, 2014. – С 1–15.

45. Официальный сайт Бирского района Республики Башкортостан [сайт]. – URL : <https://birsk.bashkortostan.ru> (дата обращения: 30.10.2025).

46. Официальный сайт Городского округа Красноуфимск [сайт]. – URL : <https://go-kruf.midural.ru> (дата обращения: 30.10.2025).

47. Официальный сайт Государственной компании «Российские автомобильные дороги» [сайт]. – URL : <https://russianhighways.ru/press/news/118021> (дата обращения: 30.10.2025).

48. Официальный сайт Дюртюлинский района Республики Башкортостан [сайт]. – URL : <https://durtuli.bashkortostan.ru/> (дата обращения: 30.10.2025).

49. Официальный сайт ЕИС [сайт]. – URL : <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/notice223/documents.html?noticeInfoId=14967645> (дата обращения: 30.10.2025).

50. Официальный сайт Октябрьского муниципального округа [сайт]. – URL : <https://oktyabrski-pk.ru> (дата обращения: 30.10.2025).

51. Официальный сайт Чернушенского муниципального округа [сайт]. – URL : <https://chernadmin.ru> (дата обращения: 30.10.2025).

52. Плаксин, С. М. Сравнительный анализ режимов государственного регулирования доступа на платные автодороги / С. М. Плаксин, А. С. Кондрашов, Е. В. Ястребов // Вопросы государственного и муниципального управления. – 2015. – № 6. – С. 99–118.

53. Повышение надежности автомобильных дорог / И. А. Золотарь, В. К. Некрасов, С. В. Коновалов, Ю. М. Яковлев, М. С. Коганзон. – Москва : Транспорт, 1977. – 183 с.
54. Повышение надежности автомобильных дорог : учеб. пособие / М.Г. Горячев. – Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2020. – 158 с.
55. Пропускная способность автомобильных дорог / Е. М. Лобанов, В. В. Сильянов, Ю. М. Ситников, Л. Н. Сапегин. – Москва : Транспорт, 1970. – 151 с.
56. Реконструкция автомобильных дорог. Технология и организация работ : учебное пособие МАДИ (ТУ) / А. П. Васильев, Ю. М. Яковлев, М. С. Коганзон [и др.]. – Москва : Московский государственный автомобильно-дорожный институт (технический университет), 1998. – 125 с.
57. Сетевое издание Информационный ресурс СПАРК [сайт]. – URL : <https://spark-interfax.ru> (дата обращения: 30.11.2025).
58. Сиденко, В. М. Управление качеством в дорожном строительстве / В. М. Сиденко, С. Ю. Рокас. – Москва : Транспорт, 1981. – 252 с.
59. Сильянов, В. В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог / В. В. Сильянов. – Москва : Транспорт, 1984. – 287 с.
60. Солтовец, М. В. Инженерные методы управления качеством / М. В. Солтовец, М. А. Капустинский, А. Ф. Хлебугов. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2003. – 135 с.
61. Стенограмма доклада Евгения Дитриха на заседании Правительства Российской Федерации о проекте новой транспортной стратегии РФ до 2035 года // Официальный Интернет-ресурс Министерства транспорта Российской Федерации [сайт]. – URL : <https://www.mintrans.ru/documents/16/10521> (дата обращения: 06.07.2024).
62. СТО АВТОДОР 2.2.-2013. Рекомендации по прогнозированию интенсивности дорожного движения на платных участках автомобильных

дорог государственной компании «Автодор» и доходов от их эксплуатации: стандарт Государственной компании «Автодор» : дата введения 12.04.2013 / Общество с ограниченной ответственностью «Концессионная инфраструктурная компания ТРАНСПРОЕКТ». – Москва, 2013. – С. 57.

63. СТО АВТОДОР 4.2.-2020. Служба аварийных комиссаров на автомобильных дорогах государственной компании «Автодор». Технические и организационные требования, порядок взаимодействия: стандарт Государственной компании «Автодор» : дата введения 31.07.2020 / Департамент эксплуатации и безопасности дорожного движения Государственной компании «Российские автомобильные дороги». – Москва, 2020. – С. 97.

64. ТестФирм [сайт]. – URL : [https:// testfirm.ru](https://testfirm.ru) (дата обращения: 30.11.2025).

65. Транспондеры [сайт]. – URL : <https://avtodor-tpass.ru/blogs/news/svobodnyu-potok-kak-oplatit-proezd-po-m-12> (дата обращения: 06.07.2024).

66. Целковнев, Д. А. Алгоритм оценки эффективности инновационных проектов создания платных автомобильных дорог: ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия / Д. А. Целковнев. – Воронеж, 2010. – С 35–38.

67. Черепанов, В. А. Транспорт в планировке городов / В. А. Черепанов. – Москва : Стройиздат, 1970. – 308 с.

68. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. Interim Edition (Washington D.C., 2008). – URL : <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428712666/AASHTO08.pdf> (дата обращения: 10.09.2025).

69. Analysis of efficiency of toll road network development / M. O. Karpushko, I. L. Bartolomei, E. N. Karpushko, A. V. Zhidelev, V. I. Bryzgalov // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079, iss. 3. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/3/032096.

70. Analysis of Toll Discounts on Nationwide Expressway in Japan / Toshio Kutsukake, Yuichi Mohri, Hideki Oka, Shoichi Kaneko // *Transportation Research Procedia*. – 2020. – Vol. 48, iss. 10. – P. 2511–2526. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.258.

71. Athias, Laure Are public private partnerships that rigid? And why? Evidence from price provisions in French toll road concession contracts / Laure Athias, Stéphane Saussier // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2018. – Vol. 111. – P. 174–186. DOI: 10.1016/j.tra.2018.02.011.

72. Aycin, M. Simple Methodology for Evaluating Toll Plaza Operations / Murat Aycin // *Transportation Research Journal of the Transportation Research Board*. – 2006. – Vol. 1988. – P. 92–101. DOI: org/10.3141/1988-14.

73. Aycin, M. Transferability of a Stochastic Toll Plaza Computer Model / Murat Aycin // *Transportation Research Journal of the Transportation Research Board*. – 2002. – Vol. 1811. – P. 40–49. DOI: org/10.3141/1811-05.

74. Bureau of Transportation Statistics [сайт]. – URL : <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/24720> (дата обращения: 06.07.2024).

75. Burke, R. Changing perceptions on PPP games: Demand risk in Irish roads / Richard Burke, Istemi Demirag // *Critical Perspectives on Accounting*. – 2015. – Vol. 27. – P. 189–208. DOI: org/10.1016/2013.11.002.

76. Choi, T. S. The dynamics of traffic congestion: Data from a freeway Electronic Toll Collection system / T. S. Choi, Kiwing To, K. Y. Michael Wong // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2024. – Vol. 638. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.physa.2024.129597.

77. Dias, J. The Charge Collector System: A New NFC and Smartphone-based Toll Collection System / João Dias, João Nuno Matos, Arnaldo S.R. Oliveira // *Procedia Technology*. – 2014. – Vol. 17. – P. 130–137. DOI: 10.1016/j.protcy.2014.10.220.

78. Documentation des Techniques Routières Françaises: du 22 mars 1981 // Service d'etudes techniques des routes et autoroutes.

79. European Commission [сайт]. – URL : <https://cordis.europa.eu/project/id/769115> (дата обращения: 06.07.2024).

80. Farias, A. V. An overview of dynamic pricing toll roads in the United States: Pricing algorithms, operation strategies, equity concerns, and funding mechanism / Adriana Valentina Farias, Shanjiang Zhu, Atabak Mardan // *Case Studies on Transport Policy*. – 2024. – Vol. 17. – P. 1–19. DOI: 10.1016/j.cstp.2024.101226.

81. Hamilton, C. J. Vertical separation as means to establish interoperability in road tolling in Europe / Carl J. Hamilton, Jonas Eliasson // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2011. – Vol. 19. – P. 1019–1032. DOI: 10.1016/j.trc.2011.05.013.

82. Hamilton, C.J. Costs and benefits of the European directive on road tolling interoperability / Carl J. Hamilton, Jonas Eliasson // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2013. – Vol. 30. – P. 221–238. DOI: 10.1016/j.trc.2011.09.009.

83. Holguin-Veras, J. A comparative analysis of US toll policy / Jose Holguin-Veras, Mecit Cetin, Shuwen Xia // *Transportation Research*. – 2006. – Vol. 40. – P. 852–871. DOI: 10.1016/j.tra.2006.03.003.

84. Industrial standard of the people's republic of china JTG D20-2017 «Design specification for highway alignment»: Implemented on: January 01, 2018 // CCC First Highway Survey, Design and Research Institute Co.

85. Jaworski, P. Principles of the toll roads pricing / Piotr Jaworski, Kamil Liberadzki, Marcin Liberadzki // *Archives of Transport*. – 2018. – Vol. 45. – P. 43–52. DOI: org/10.5604/01/3001.0012.0941.

86. Ji, J. Y. The present and future of road Financing: Leveraging knowledge from the tolling industry to implement road-usage charge programs in the u.s / Jean Y. Ji, Debapriya Chakraborty, Alan T. Jenn // *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. – 2024. – Vol. 27. – P. 1–14. DOI: 10.1016/j.trip.2024.101240.

87. Launhardt, W. Die Bestimmung des Zweckmässigsten Standortes einer Gewerblichen Anlage, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure / W. Launhardt // Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. – 1882. – № 26. – P. 106–115.

88. Lei n.º 34/2015: de 27 de abril 2015. // O Instituto da Mobilidade e dos Transportes (IMT)..

89. Management efficiency of Chinese toll road operating companies and influencing factors / Yanling Li, Yan Xu, Yingjie Zheng, Sheng Cao, Zhenni Wu, Yijin Song // Utilities Policy. – 2024. – Vol. 90. – P. 1–10. DOI: 10.1016/j.jup.2024.101791.

90. Mizutani, F. Privatization of the Japan Highway Public Corporation: Policy Assessment / Fumitoshi Mizutani, Shuji Uranishi // Paper for the 46th Congress for European Regional Science Association, 11 April. – Greece, 2008.

91. Modeling forest road runoff and erosion at multiple temporal scales in Florida panhandle region, USA / Jingqiu Chen, Shuyuan Wang, William J. Elliot, Bernard A. Engel, Mariana Dobre // International Soil and Water Conservation Research. – 2025. – Vol. 7. – P. 1–13. DOI: 10.1016/j.iswcr.2025.09.007.

92. Nayak, R. P. Blockchain-enabled dynamic toll collection in highway VANETs using distance and weight-based payment with local validation / Rajendra Prasad Nayak, Sourav Kumar Bhoi, Ashutosh Bhoi // Computer Networks. – 2025. – Vol. 272. – P. 1–10. DOI: 10.1016/j.comnet.2025.111612.

93. Norma 3.1-IC de la Instruccion de carreteras: Por Orden de 27 de dicimbre de 1999 // Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

94. Norma funzionali e geometriche per la costruzione delle strade: Decreto Ministerale 5 Novembre 2001 // Ministero delle Infrastrutture e dei Transporti. – 2001.

95. Novel Big Data-supported dynamic toll charging system: Impact assessment on Portugal's shadow-toll highways / Paulo Figueiras, Diogo Gonçalves, Ruben Costa, Guilherme Guerreiro, Panos Georgakis, Ricardo Jardim-

Gonçalves // *Computers & Industrial Engineering*. – 2019. – Vol. 135. – P. 476–491. DOI: 10.1016/j.cie.2019.06.043.

96. Paliotto, A. Human Factors in Road Design: A Review of Italian Design Standards / Andrea Paliotto, Monica Meocci, Valentina Branzi // *Future Transportation*. – 2022. – Vol. 2(4). – P. 902–922. DOI: 10.3390/futuretransp2040050.

97. Regalado López, F. J. An Approximation to Technical Efficiency in Spanish Toll Roads through a DEA approach / Francisco J. Regalado López, José Magín Campos Cacheda // *Transportation Research Procedia*. – 2018. – Vol. 33. – P. 386–393. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.11.005.

98. Shimizu, T. A Comparison Study on Road Speed Setting and Geometric Design Standard between Japan and Korea- How Differ and Why? / Tetsuo Shimizu, Koji Kawaguchi // *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. – 2009. – Vol. 7. – P. 1–15. DOI: 10.11175/eastpro.2009.0.314.0.

99. Silvano, A. P. Impact of Speed Limits and Road Characteristics on Free-Flow Speed in Urban Areas / Ary P. Silvano, Karl L. Bang // *Journal of Transportation Engineering*. – 2016. – Vol. 142. – P. 1–9. DOI: org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000800.

100. Theeuwes, J. Self-explaining roads: What does visual cognition tell us about designing safer roads? / Jan Theeuwes // *Cognitive Research: Principles and Implications*. – 2021. – Vol. 6. – P. 1–15. DOI: 10.1186/s41235-021-00281-6.

101. Toriumi, A. Electronic Toll Collection / Azusa Toriumi // *International Encyclopedia of Transportation*. – 2021. – Vol. 1. – P. 60–67. DOI: 10.1016/B978-0-08-102671-7.10295-7.

102. Truong, T. M. Thanh Success factors for financial sustainability of toll road projects: empirical evidence from China / Thi My Thanh Truong, Hanno Friedrich, Chotchai Charoenngam // *Transportation Research Procedia*. – 2020. – Vol. 48, iss. 10. – P. 1848–1860. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.219.

103. Vadali, S. R. Toll roads and economic development: Exploring effects on property values / Sharada R. Vadali // *The Annals of Regional Science*. – 2008. – Vol. 42. – P. 591–620. DOI: [org/10.1007/s00168-007-0180-0](https://doi.org/10.1007/s00168-007-0180-0).

104. Van Aerde, M. Multivariate Calibrations of Single Regime Speed-Flow-Density Relationships / Michel Van Aerde, Hesham Rakha // *Vehicle Navigation and Information Systems Conference*. – 1995. DOI: [10.1109/VNIS.1995.518858](https://doi.org/10.1109/VNIS.1995.518858).

105. Wang, X. C. What to do in response to toll increases: A behavioral analysis of freight carriers in New York State/ Xiaokun Cara Wang, Woojung Kim, Dapeng Zhang // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2023. – Vol. 173. – P. 1–15. DOI: [10.1016/j.tra.2023.103725](https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103725).

106. Xu, Y. Study on the Operation Efficiency of Toll Roads in China from the Perspective of Scale Economy / Yan Xu, Jianqiang Fan, Haicheng Xu // *Advanced Transportation*. – 2021. – Vol. 5. – P. 1–15. DOI: [10.1155/2021/8830521](https://doi.org/10.1155/2021/8830521).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1
Таблицы расчетов оценки эффективности внедрения инновационных решений

Таблица 1.1 – Расчет итогового коэффициента обеспеченности расчетной скорости и средней скорости транспортного потока по традиционному решению

№ П/П	Год	K_{pc1}	K_{pc2}	K_{pc3}	K_{pc4}	K_{pc5}	K_{pc6}	K_{pc7}	K_{pc8}	K_{pc9}	K_{pc10}	$\min K_{pc}$	V_i	V_{max}	ΔV	ΔK_c	$t_{\sigma v}$	Интенсивность
0	2025	0,90	1,25	0,81	0,87	0,73	1,25	1,00	0,74	1,25	1,25	0,73	65,98	87,60	10,80	0,09	10,82	9360
1	2026	0,90	1,25	0,81	0,87	0,73	1,25	1,00	0,72	1,00	1,25	0,72	65,05	86,48	10,80	0,09	10,64	9454
2	2027	0,90	1,25	0,81	0,87	0,73	1,25	1,00	0,71	0,90	1,25	0,71	63,55	84,71	10,80	0,09	10,35	9549
3	2028	0,90	1,25	0,81	0,87	0,73	1,25	1,00	0,69	1,25	1,25	0,69	62,09	82,96	10,80	0,09	10,07	9645
4	2029	0,90	1,25	0,81	0,87	0,73	1,25	1,00	0,68	1,00	1,25	0,68	60,66	81,26	10,80	0,09	9,80	9742
5	2030	0,90	1,25	0,81	0,87	0,73	1,25	1,00	0,66	0,90	1,25	0,66	59,24	79,59	10,80	0,09	9,54	9840
6	2031	0,90	1,25	0,81	0,87	0,73	1,25	1,00	0,65	1,25	1,25	0,65	57,84	77,95	10,80	0,09	9,31	9939
7	2032	0,90	1,25	0,80	0,87	0,73	1,22	1,00	0,64	1,00	1,25	0,64	55,26	76,34	12,00	0,10	9,09	10039
8	2033	0,90	1,25	0,80	0,87	0,73	1,18	1,00	0,62	0,90	1,25	0,62	53,91	74,77	12,00	0,10	8,87	10140
9	2034	0,90	1,25	0,80	0,87	0,73	1,15	1,00	0,61	1,25	1,25	0,61	52,58	73,24	12,00	0,10	8,65	10242
10	2035	0,90	1,25	0,80	0,87	0,73	1,12	1,00	0,60	1,00	1,25	0,60	51,29	71,73	12,00	0,10	8,44	10345
11	2036	0,90	1,25	0,80	0,87	0,73	1,10	1,00	0,59	0,90	1,25	0,59	50,02	70,26	12,00	0,10	8,24	10449

Продолжение приложения 1

Таблица 1.2 – Расчет итогового коэффициента обеспеченности расчетной скорости и средней скорости транспортного потока по инновационному решению

№ п/п	Год	K_{pc1}	K_{pc2}	K_{pc3}	K_{pc4}	K_{pc5}	K_{pc6}	K_{pc7}	K_{pc8}	K_{pc9}	K_{pc10}	$\min K_{pc}$	V_i	V_{max}	ΔV	ΔK_c	$t\sigma v$	Интенсивность
0	2025	1,00	1,25	0,91	1,10	1,16	1,25	1,00	0,82	1,25	1,25	0,82	75,31	98,91	10,80	0,09	12,80	9360
1	2026	1,00	1,25	0,91	1,10	1,16	1,25	1,00	0,81	1,00	1,25	0,81	73,64	96,88	10,80	0,09	12,44	9454
2	2027	1,00	1,25	0,91	1,10	1,16	1,25	1,00	0,79	0,90	1,25	0,79	72,00	94,88	10,80	0,09	12,08	9549
3	2028	1,00	1,25	0,91	1,10	1,16	1,25	1,00	0,77	1,25	1,25	0,77	70,40	92,93	10,80	0,09	11,73	9645
4	2029	1,00	1,25	0,91	1,10	1,16	1,25	1,00	0,76	1,00	1,25	0,76	68,84	91,02	10,80	0,09	11,38	9742
5	2030	1,00	1,25	0,91	1,10	1,16	1,25	1,00	0,74	0,90	1,25	0,74	67,28	89,15	10,80	0,09	11,06	9840
6	2031	1,00	1,25	0,91	1,10	1,16	1,25	1,00	0,73	1,25	1,25	0,73	65,74	87,31	10,80	0,09	10,77	9939
7	2032	1,00	1,25	0,90	1,10	1,16	1,25	1,00	0,71	1,00	1,25	0,71	63,04	85,52	12,00	0,10	10,48	10039
8	2033	1,00	1,25	0,90	1,10	1,16	1,25	1,00	0,70	0,90	1,25	0,70	61,56	83,76	12,00	0,10	10,20	10140
9	2034	1,00	1,25	0,90	1,10	1,16	1,25	1,00	0,68	1,25	1,25	0,68	60,11	82,04	12,00	0,10	9,93	10242
10	2035	1,00	1,25	0,90	1,10	1,16	1,25	1,00	0,67	1,00	1,25	0,67	58,69	80,35	12,00	0,10	9,66	10345
11	2036	1,00	1,25	0,90	1,10	1,16	1,25	1,00	0,66	0,90	1,25	0,66	57,21	78,70	12,00	0,10	9,48	10449

Продолжение приложения 1

Таблица 1.3 – Расчет затрат и потерь для традиционного решения

№ п/п	Год	Дорожные затраты, тыс. руб.			Транспортные и внутранспортные затраты, тыс. руб.				Всего затрат, тыс.руб.	Дисконтный множитель	Всего дисконтированных затрат, тыс.руб.
		Строительство	Содержание	Итого	K_{at}	C_{at}	P_t	Π_t			
0	2025	28138,42		28138,42	18,086	7957,67	12333,74	0,220	48448,14	1,000	48448,14
1	2026	-	1405,43	1405,43	18,269	8037,40	12459,23	0,222	21920,55	0,909	19925,78
2	2027	-	1405,43	1405,43	18,451	8118,35	12582,63	0,225	22125,08	0,826	18275,32
3	2028	-	1405,43	1405,43	18,639	8200,76	12710,21	0,227	22335,26	0,751	16773,78
4	2029	-	1405,43	1405,43	18,823	8282,29	12837,79	0,229	22544,56	0,683	15397,93
5	2030	-	1405,43	1405,43	19,015	8366,51	12967,47	0,231	22758,65	0,621	14133,12
6	2031	-	1405,43	1405,43	19,208	8450,72	13097,14	0,234	22972,73	0,564	12956,62
7	2032	-	1405,43	1405,43	19,401	8535,73	13228,91	0,236	23189,70	0,513	11896,32
8	2033	-	1405,43	1405,43	19,595	8621,53	13362,77	0,238	23409,56	0,467	10932,26
9	2034	-	1405,43	1405,43	19,789	8707,33	13496,63	0,241	23629,42	0,424	10018,87
10	2035	-	1405,43	1405,43	19,991	8795,82	13632,57	0,243	23854,05	0,386	9207,66
11	2036	-	1405,43	1405,43	20,190	8883,42	13768,52	0,246	24077,80	0,350	8427,23
S		28138,42	15459,68	43598,10	229,46	100957,53	156477,61	2,790	301265,49	-	196393,03

Продолжение приложения 1

Таблица 1.4 – Расчет затрат и потерь для инновационного решения

№ п/п	Год	Дорожные затраты, тыс. руб.			Транспортные и внутранспортные затраты, тыс. руб.				Всего затрат, тыс.руб.	Дисконтный множитель	Всего дисконтированных затрат, тыс.руб.
		Строительство	Содержание	Итого	K_{at}	C_{at}	P_t	Π_t			
0	2025	35127,14		35127,14	16,030	7100,13	11100,36	0,220	53343,88	1,000	53343,88
1	2026	-	1124,34	1124,34	16,192	7172,17	11213,30	0,222	19526,22	0,909	17749,34
2	2027	-	1124,34	1124,34	16,354	7243,49	11324,36	0,225	19708,77	0,826	16279,44
3	2028	-	1124,34	1124,34	16,520	7317,03	11439,19	0,227	19897,31	0,751	14942,88
4	2029	-	1124,34	1124,34	16,683	7389,78	11554,01	0,229	20085,04	0,683	13718,08
5	2030	-	1124,34	1124,34	16,854	7464,92	11670,72	0,231	20277,07	0,621	12592,06
6	2031	-	1124,34	1124,34	17,024	7540,05	11787,43	0,234	20469,08	0,564	11544,56
7	2032	-	1124,34	1124,34	17,196	7615,90	11906,02	0,236	20663,69	0,513	10600,47
8	2033	-	1124,34	1124,34	17,368	7692,46	12026,49	0,238	20860,90	0,467	9742,04
9	2034	-	1124,34	1124,34	17,540	7769,02	12146,96	0,241	21058,10	0,424	8928,63
10	2035	-	1124,34	1124,34	17,719	7847,96	12269,32	0,243	21259,58	0,386	8206,20
11	2036	-	1124,34	1124,34	17,895	7926,12	12391,67	0,246	21460,27	0,350	7511,09
S		35127,14	12367,74	47494,88	203,375	90079,03	140829,83	2,79	278609,91	-	185158,68

Окончание приложения 1

Таблица 1.5 – Показатели эффективности внедрения инновационного решения

№ п/п	Год	Дорожные затраты, тыс. руб.			Транспортные и внутранспортные затраты, тыс. руб.				Чистый доход по годам, тыс.руб.	Дисконтный множитель	Всего дисконтированных затрат, тыс.руб.
		Строительство	Содержание	Итого	K_{at}	C_{at}	P_t	Π_t			
0	2025	-6988,72		-6988,72	2,056	857,54	1233,38	-	-4895,74	1,000	-4895,74
1	2026	-	281,09	281,09	2,077	865,23	1245,93	-	2394,32	0,909	2176,44
2	2027	-	281,09	281,09	2,097	874,86	1258,27	-	2416,31	0,826	1995,87
3	2028	-	281,09	281,09	2,119	883,73	1271,02	-	2437,95	0,751	1830,90
4	2029	-	281,09	281,09	2,140	892,51	1283,78	-	2459,52	0,683	1679,85
5	2030	-	281,09	281,09	2,161	901,59	1296,75	-	2481,59	0,621	1541,06
6	2031	-	281,09	281,09	2,184	910,67	1309,71	-	2503,65	0,564	1412,06
7	2032	-	281,09	281,09	2,205	919,83	1322,89	-	2526,01	0,513	1295,84
8	2033	-	281,09	281,09	2,227	929,07	1336,28	-	2548,66	0,467	1190,23
9	2034	-	281,09	281,09	2,249	938,31	1349,67	-	2571,31	0,424	1090,24
10	2035	-	281,09	281,09	2,272	947,86	1363,25	-	2594,47	0,386	1001,46
11	2036	-	281,09	281,09	2,295	957,3	1376,85	-	2617,53	0,350	916,14
S		-6988,72	3091,94	-3896,78	26,08	10878,50	15647,78	0	22655,58	-	11234,35

Приложение 2 Акты внедрения

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
**«Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет»
(ПНИПУ)**

614990, Пермский край, г. Пермь,
Комсомольский проспект, д. 29,
тел. 8(342) 219-80-67,
факс 8(342) 219-89-27, e-mail: rector@pstu.ru
<http://www.pstu.ru>

На № 15.05.2028 от № 49с-249



ТВЕРЖДАЮ

Профессор по образовательной
деятельности доктор педагогических наук,
Черникова И.Ю.

АКТ

**внедрения результатов диссертационного исследования Брызгалова В.И.
по теме: «Управление транспортно-эксплуатационными параметрами платных
автомобильных дорог для обеспечения надежности повышенного скоростного
режима»**

Комиссия в составе: Клевко В.И. – и.о. заведующего кафедрой «Автомобильные дороги и мосты», доцент, кандидат технических наук; Добрынин А.О. – доцент кафедры «Автомобильные дороги и мосты», кандидат технических наук; Сергеев А.С. – доцент кафедры «Автомобильные дороги и мосты», кандидат технических наук, настоящим актом подтверждает внедрение результатов научно-исследовательской работы на тему «Управление транспортно-эксплуатационными параметрами платных автомобильных дорог для обеспечения надежности повышенного скоростного режима» (автор – Брызгалов В.И.) в учебный процесс кафедры «Автомобильные дороги и мосты» для преподавания дисциплин Б1.В.01 «Изыскания и проектирование автомобильных дорог», Б1.В.10 «Дорожные условия и безопасность движения», Б1.В.12 «Экономика дорожной отрасли» у студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство», а также дисциплин Б1.В.01 «Современные методы изыскания и проектирования автомобильных дорог и автомагистралей», Б1.В.06 «Анализ дорожной безопасности и управление автомобильными дорогами и городскими улицами» у магистрантов направления подготовки 08.04.01 «Строительство».

Председатель комиссии:

В.И. Клевко

Члены комиссии:

А.О. Добрынин

А.С. Сергеев



Сертифицировано
«РУССКИМ РЕГИСТРОМ»

Продолжение приложения 2



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«Пермский государственный
аграрно-технологический университет
имени академика Д.Н. Прянишникова»
(ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ)

ул. Петропавловская, д. 23, г. Пермь, ГСП-165, 614990
Тел./факс +7 (342) 217 96 17 E-mail: info@pgatu.ru
ОКПО 00493445, ОГРН 1025900524451
ИНН/КПП 5902290794/590201001

№ _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по научно-инновационной
работе и международному
сотрудничеству

Акманаев Э.Д.

11 2025г

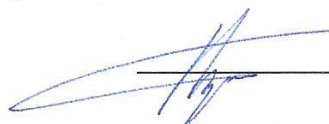
АКТ

**внедрения результатов диссертационного исследования Брызгалова В.И.
по теме: «Управление транспортно-эксплуатационными параметрами платных
автомобильных дорог для обеспечения надежности повышенного скоростного
режима»**

Настоящий акт удостоверяет, что комиссией в составе: Пугин К.Г., доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительных технологий; Середа Т.Г. доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных технологий; Костарев С.Н. доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных технологий подтверждается внедрение в учебный процесс результатов диссертационной работы Брызгалова Владислава Игоревича на тему «Управление транспортно-эксплуатационными параметрами платных автомобильных дорог для обеспечения надежности повышенного скоростного режима». Результаты диссертационного исследования используются при обучении студентов направления 08.03.01 Строительство при изучении ими предметов: «Изыскания и проектирование автомобильных дорог (информационное моделирование)»; «Строительство, содержание и реконструкция автомобильных дорог (информационное моделирование)».

В учебные материалы внедрены результаты статистического исследования, доказавшие наличие устойчивой связи между состоянием дорожного полотна (ровность, прочность, геометрия) и динамикой транспортного потока. Подтверждено, что ухудшение качества дороги приводит к статистически значимому снижению как средних показателей движения, так и их вариабельности, особенно в зоне предельно допустимых значений. Это обосновывает важность комплексного подхода к управлению дорожным хозяйством, учитывающего не только средний уровень характеристик, но и их однородность, для повышения безопасности и эффективности дорожного движения.

Председатель комиссии:

 К.Г. Пугин



Министерство образования и науки Пермского края
краевое государственное автономное профессиональное образовательное
учреждение

«Пермский строительный колледж»

(КГАПОУ ПСК)

614039, г. Пермь, Комсомольский пр., 59, тел. (342) 244-13-22, факс (342) 244-36-62

ИНН 5904101308 КПП 590401001 ОГРН 1025900914016 ОКПО 01266384

E-mail: kgapou.psk@gmail.com, www.psk.perm.ru

УТВЕРЖДАЮ

Директор КГАПОУ ПСК

Коновалов И.А.

2026 г.

« 5 »

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования
«Управление транспортно-эксплуатационными параметрами платных
автомобильных дорог для обеспечения надежности повышенного
скоростного режима» соискателя Брызгалова В.И.

Настоящий акт подтверждает внедрение результатов диссертационного исследования на тему «Управление транспортно-эксплуатационными параметрами платных автомобильных дорог для обеспечения надежности повышенного скоростного режима», автор – Брызгалов В.И., в учебный процесс краевого государственного автономного профессионального образовательного учреждения «Пермский строительный колледж».

Материалы исследований используются для преподавания дисциплин «Изыскания и проектирование автомобильных дорог», «Строительство автомобильных дорог» и «Ремонт и содержание автомобильных дорог» у студентов направления подготовки 08.02.05 «Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и аэродромов».

Директор КГАПОУ ПСК:

Коновалов И.А.